



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**“EFECTO DE LAS VARIABLES, TEMPERATURA DE COLADA,
PORCENTAJE DE HUMEDAD Y SISTEMA DE COLADA, SOBRE LOS
EFECTOS EN UNA PIEZA DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO 535”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:

Salvador Ignacio Pérez Castillo



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO.

VOCAL: Profesor: ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA.

SECRETARIO: Profesor: AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO.

1er. SUPLENTE: Profesor: HECTOR ISRAEL QUIROGA HERRERA.

2° SUPLENTE: Profesor: LEOPOLDO ARZATE ORTEGA.

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO, FACULTAD DE
QUÍMICA, CONJUNTO "D"**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

ASESOR DEL TEMA:

DR. ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA

SUSTENTANTE:

SALVADOR IGNACIO PÉREZ CASTILLO

INDICE.

Introducción:.....	4
Hipótesis:	5
Objetivo general:	5
Objetivos particulares:	5
<i>Capítulo 1 Antecedentes</i>	6
1.1 Diseño de experimentos:.....	7
1.2 Acerca de los resultados de Minitab.....	7
1.3 Moldeo en verde.	9
1.3.1 Bentonitas como aglutinantes inorgánicos naturales.	11
1.3.2 Control de tolerancias en los modelos.....	12
1.4 Tratamientos al metal líquido.....	12
1.4.1 Fluxing y escorificantes.	13
1.4.2 Contenido de hidrogeno y desgasificación.	14
1.4.3 Eliminación del hidrogeno	15
1.4.4 Métodos de desgasificación mediante la inyección de un gas.	17
1.5 Características de las aleaciones de aluminio.	17
1.5.1 Especificaciones de las aleaciones de aluminio.	18
1.5.2 Designaciones de aleación de aluminio.....	19
1.5.3 Sistema de designación de aleación de fundición de la Asociación de Aluminio (AA).....	20
<i>Capítulo 2 Marco Teórico</i>	22
2.1 Descripción de la aleación 535:	23
2.2 Composición química de la aleación 535.....	23
2.3 Propiedades físicas y químicas de la aleación 535.....	24
2.4. Defectos.....	25
2.4.1 Defectos relacionados con la arena y técnica de moldeo.....	26
2.5. Defectos relacionados con el vertido de metal y el sistema de colada.....	28
2.6. Defectos por contracción.	29
2.7. Defectos por gases.....	29
<i>Capítulo 3 Desarrollo Experimental</i>	31
3.1 Mezcla del moldeo en verde.....	32
3.2 Porcentaje de bentonitas y ensayos mecánicos respectivos.....	32

3.3 Modelo físico.....	32
3.4 Placa modelo.....	33
3.5 Cálculo y diseño de los sistemas de colada.....	33
3.5.1 Alimentadores.....	33
3.5.2 Cálculo de los módulos de solidificación.....	34
3.5.3 Cálculo del diámetro con ángulo de salida.....	36
3.5.4 Sistema de colada.....	37
3.6 Fabricación de la aleación 535.....	44
3.7 Mezcla de moldeo y fabricación de moldes.....	44
3.8 Técnica de fusión y tratamientos al metal líquido:	45
Capítulo 4 Resultados.....	46
4.1 Composición química.....	47
4.2 Piezas.....	48
4.3 Análisis de imágenes.....	56
4.4 Resultados del análisis de imagen.....	58
Capítulo 5 Discusión de resultados.....	62
5.1 Diseño factorial.....	63
5.2 Defectos externos.....	64
5.3 Defectos internos.....	73
5.4 Dificultades en el análisis de imagen.....	76
Conclusiones.....	77
Referencias bibliográficas.....	79
Anexo a: Cuantificación del área de defectos externos.....	80
Anexo b: Cuantificación del área de defectos internos.....	137

Introducción:

Las fundiciones fueron el primer mercado importante para las aleaciones de aluminio, después de la comercialización del proceso Hall-Herault. Al principio las aplicaciones de estas aleaciones base aluminio se limitaban a piezas de casa, espejos de mano, piezas de peines y cepillos, etc. La demanda de aleaciones de aluminio se ha incrementado en la actualidad, por su relación de buenas propiedades y baja densidad, y en conjunto con la exigencia de la industria como la aeronáutica, aeroespacial, eléctrica y automotriz. La manufactura de piezas por el proceso de fundición, debe cumplir la calidad que el cliente demanda, para ser competitivo en el mercado.

Las aleaciones de aluminio de fundición, así como las de forja coincidieron como materiales alternativos en 3 principales mercados:

- Para electricidad, donde se exigen cables con una baja densidad, buena resistencia a la corrosión y con una alta conductividad, así como también torres de transmisión, para los cuales el aluminio es adecuado.
- Los pioneros de la automoción buscaron materiales y formas de productos innovadores para diferenciar el rendimiento y la apariencia de sus productos.
- Cuando se tuvo éxito en el vuelo motorizado, para el motor y otras piezas de aluminio fundido fue el comienzo de una estrecha colaboración para lo que se convertiría en la industria aeronáutica y aeroespacial.

Se generó un gran número de aplicaciones en las cuales el aluminio compitió en los mercados, para ello se requirió generar composiciones y condiciones especializadas para satisfacer los requisitos específicos de la ingeniería demandante. La caracterización de las propiedades físicas y mecánicas, así como los resultados de las pruebas de rendimiento fueron las bases para el desarrollo y las continuas mejoras, así como el control de las composiciones.

En los últimos años se ha buscado reducir la huella ecológica que deja la quema de combustibles fósiles y otras alternativas altamente contaminantes, requiriendo una eficiencia energética mayor para que los costos de la gasolina y el petróleo no vayan en aumento. La preocupación ambiental de la sociedad y los gobiernos, la competitividad global y las preocupaciones sobre materias primas crean iniciativa para tratar de reducir el consumo de combustible fósil con alto rendimiento y un costo de los productos, y al tiempo que esto ocurre las aleaciones de aluminio al poseer excelentes características y propiedades, tanto físicas, químicas y mecánicas, se convierten en una gran alternativa para el desarrollo e implementación como material ligero, elevando la eficiencia de los combustibles sin tener que sacrificar seguridad para los usuarios teniéndolo a un menor costo.

Hipótesis:

Un control correcto en las variables del proceso para la fabricación de piezas con aleación 535 como: temperatura de colada, sistema de colada y porcentaje de humedad en la mezcla de moldeo, disminuyen la formación de defectos en la pieza como la porosidad.

Objetivo general:

Determinar el efecto que tienen las 3 variables principales en el proceso de fabricación por moldeo en verde: temperatura de colada, % de humedad en mezcla de moldeo y sistema de colada, sobre los defectos externos e internos presentes en una pieza de aleación 535 similar a una utilizada en la industria eléctrica.

Objetivos particulares:

- Fabricar una pieza similar a la utilizada en la industria eléctrica por medio del proceso del moldeo en verde.
- Realizar la fabricación y ajuste de la aleación 535 a partir de aluminio puro Magnesio y reciclado de latas.
- Determinar el efecto de la temperatura de vaciado en una pieza que se fabrica con la aleación 535, sobre los defectos presentes.
- Diseñar y fabricar dos sistemas de colada no presurizados con relación 1:2:3 y 1:3:6 para una pieza que se fabrica con la aleación 535, para evaluar el efecto sobre los defectos presentes por el sistema de colada.
- Determinar el efecto del % de humedad en la mezcla de moldeo de 3.1% (temper) y 5% para una pieza que se fabrica con la aleación 535, para evaluar el efecto sobre los defectos presentes.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 Diseño de experimentos

Se utilizó un diseño estadístico factorial a dos niveles con 3 factores (variables), es decir 2^3 . Las 3 variables son: temperatura de vaciado, porcentaje de humedad en la mezcla de moldeo en verde y sistema de colada. La **Tabla 1** muestra la matriz de experimentos, y cada experimento se realizó por duplicado.

Tabla 1. Matriz de experimentos						
Experimento	rangos de variable			Variables	rangos	
	1	2	3		-	+
1	-	-	-	1. Temperatura de colada	720	760
2	+	-	-	2. % de Humedad en la mezcla de moldeo en verde	3.1	5
3	-	+	-	3. sistema de colada	No presurizado 1 (1:3:6)	No presurizado 2 (1:2:3)
4	+	+	-			
5	-	-	+			
6	+	-	+			
7	-	+	+			
8	+	+	+			

1.2 Acerca de Minitab y sus resultados de Minitab

Minitab es un programa de computadora diseñado como herramienta estadística para un fácil manejo, que se enfoca en el análisis de datos, mejora de productos y servicios para la implementación en proyectos de mejora de calidad. Se utiliza principalmente en el sistema Six Sigma en empresas. Cumple con funciones estadísticas básicas y avanzadas.

Minitab también cumple con diferentes funciones como:

- Gestión de datos y archivo-hoja de cálculo para un mejor análisis de datos
- Análisis de regresión, potencia y tamaño de muestra
- Tablas y gráficos
- Análisis multivariante que incluye análisis factorial, análisis de conglomerados, análisis de correspondencia, etc.
- Nonparametrics, varias pruebas, pruebas de signos, prueba de Friedman, etc.

- Previsión: herramientas que ayudan a mostrar las tendencias en los datos, así como, la predicción de valores futuros en series temporales y series de tiempo, suavización exponencial y análisis de tendencias.
- Control estadístico de procesos.
- Análisis de sistema de medición.
- Análisis de varianza, en la determinación de la diferencia entre los puntos de datos.

Después de agregar los tipos de factores se tendrá que generar una tabla de los análisis de varianza, que mostrara si los factores que fueron elegidos tienen significancia sobre los defectos en la superficie de la pieza, utilizando un valor de significancia de 0.05 se tendrá que determinar si los 3 factores por separado y sus interacciones son significativos según el valor de probabilidad (p) reportado en la tabla de varianza.

De igual manera se generará una tabla de coeficientes codificados, donde se encontrará:

Efecto del factor: es el cambio en la respuesta media cuando el factor cambia de nivel bajo al alto y su signo indica la dirección de la relación entre el término y la respuesta. [13]

Coefficiente: es el cambio que tienen la respuesta media asociado al aumento de una unidad codificada en ese término, mientras que los otros términos se mantienen constantes y su signo indica la dirección de la relación entre el término y la respuesta. [13]

Error estándar del coeficiente; se usa para medir la precisión de la estimación del coeficiente y mientras menor sea el error estándar, más precisa será la estimación. Al dividir el coeficiente entre su error estándar, se obtiene un valor T . si se comparan el valor p asociado con el valor T y es menor que el nivel de significancia, se dice que el coeficiente es estadísticamente significativo. Dicho valor T mide la relación entre el coeficiente y su error estándar y este se puede utilizar para calcular el valor p y este a su vez se usa para comprobar si el coeficiente es significativamente diferente de 0. T se podría utilizar para rechazar la hipótesis nula. Sin embargo, el valor p se utiliza con más frecuencia debido a que no usa los grados de libertad. [13]

Factor de inflación de varianza (VIF); indica cuánto aumentó la varianza de un coeficiente por la causa de las correlaciones entre los predictores en el modelo. Todos los valores de VIF son de 1 en la mayoría de los diseños factoriales, lo que indica que los predictores no tienen multicolinealidad. La ausencia de esta multicolinealidad simplifica la determinación de significancia estadística. [13]

Otra forma de interpretación de resultados que se ofrece es la obtención de un diagrama de Pareto. Este diagrama muestra la magnitud y la importancia de un efecto o variable. El diagrama muestra el valor absoluto de los efectos y se traza una línea de referencia en la gráfica que depende del nivel de significancia (alfa) y determina cuales efectos son estadísticamente significativos. Cualquier efecto que se extienda más allá de esta línea de referencia será siempre estadísticamente significativo. Con este diagrama es más sencillo analizar qué factores y sus interacciones son los que provocan una mayor cantidad de defectos.

Finalmente se obtienen gráficos de análisis de interacciones los cuales ayudan a obtener la combinación de factores en los que se obtiene mayores respuestas por parte de las variables y así determinar cuáles generan menos defectos y cuáles son los que más defectos forman.

Este fue el procedimiento a seguir ya realizadas las 8 fusiones, analizadas todas las piezas con el software image J y obtenido el valor de área afectada. Con lo cual se determinará que combinación entre los factores Temperatura de colada, diseño de sistema de colada y %de humedad son las que mejor respuesta tienen para la disminución de defectos en la fabricación de la pieza problema.

1.3 Moldeo en verde

El moldeo de arena en verde es el más sencillo y versátil de los procesos de fundición. Este proceso es usado en la producción de grandes y bajas cantidades de piezas idénticas de fundición, así como, para piezas donde se utilizan corazones complicados y para piezas fundidas que se utilizan para la construcción y trabajos pesados. Los moldes de arena se han usado desde tiempos remotos debido a su facilidad de uso, la facilidad de imprimir las piezas en la arena y la calidad de la pieza final. En la actualidad la producción por este medio es alta debido a la velocidad de producción, los bajos costos de producción de moldes, además de que cada vez el proceso es más preciso y/o exacto debido al agregado de maquinaria automática que hace más fácil la producción de dichos moldes.

Estos moldes de arena en verde generalmente son elaborados con una mezcla de arena sílice, bentonitas, agua y aditivos. Son excelentes para trabajar con todo tipo de aleaciones y todo tipo de piezas.

La fundición en arena es un proceso muy versátil, pues proporciona una gran libertad de diseño en términos de tamaños, forma y calidad del producto. Para

este proceso se utilizan distintos tipos de arenas, como la sílice, circonia, olivina o cromita, aunque las más utilizadas en aleaciones base aluminio son la sílice y el circón. Las arenas de sílice para fundiciones están compuestas casi en su totalidad por cuarzo, SiO_2 . La arena de sílice se utiliza principalmente porque es económica y muy disponible, aunque las reacciones cristalográficas que sufre el cuarzo al calentarse pueden producir una serie de defectos en la fundición.

Los pasos básicos para la producción de moldes en arena son las siguientes:

1. Colocar una placa modelo que tiene la forma de la fundición que se desea en la arena para producir la impresión.
2. Incorporar los sistemas de colada y alimentación.
3. Retirar la placa modelo y llenar la cavidad en la arena con el metal fundido.
4. Esperar a que el metal enfríe y solidifique.
5. Separar la pieza solidificada de la arena y limpiarla.
6. Quitar los sistemas de alimentación y en caso de requerirlo darle un acabo final.

La mezcla de moldeo debe cumplir con normas de calidad que se realizan con ensayos y pruebas periódicas. Varias de estas pruebas se realizan para determinar propiedades en la arena para moldear, como:

Resistencia en húmedo: Es la capacidad de la arena húmeda para formar aglutinaciones o de adherirse y mantener la forma que se le da al molde.

Resistencia en seco: Es la resistencia de la arena para mantener la forma de la cavidad del molde cuando el metal fundido toca las paredes de la cavidad y evapora el agua, secando inmediatamente dicho sector en el molde de arena.

Termoestabilidad: Resistencia en caliente y termoestabilidad son propiedades de la arena que permiten su estabilidad dimensional en un amplio rango de temperaturas.

Permeabilidad: es la facilidad de escape que tiene el vapor de agua producido por el paso del metal líquido a alta temperatura por las cavidades húmedas del molde, a través de la estructura porosa del molde. Además de los gases producidos por la quema de las bentonitas, aditivos, etc.

Comportamiento refractario: es la capacidad de la arena de mantener sus propiedades dimensionales y su integridad. Es decir, que no se funde ni deforma en presencia del metal a altas temperaturas.

Fluidez: Reacción de la arena al proceso de formación del molde y facilidad con la cual toma la forma deseada de la impresión.

Plasticidad: Capacidad de la arena extensible por inclusión de aglomerantes para ser fácilmente moldeable en estado húmedo y reproduzca los detalles de los modelos.

Conductividad calorífica: disipación adecuada del calor para que el material fundido enfríe y solidifique en el molde a la velocidad requerida de equilibrio.

Deformabilidad: suficiente, que permita la contracción de la pieza al enfriarse.

Humedad de las arenas: una determinada humedad en la arena de moldeo. Favorece y mejora la plasticidad de la mezcla arena-aglutinante (arcillas). Al modificarse el contenido de humedad cambian las propiedades útiles de la arena. [10]

El tamaño, la distribución y la forma de los granos de arena son importantes para controlar la calidad del molde. Debe tenerse en cuenta que la forma del grano contribuye a la cantidad de superficie de arena, mientras que la distribución del tamaño controla la permeabilidad del molde. A medida que aumenta la superficie de la arena, la cantidad del material de unión debe aumentar para lograr las propiedades mecánicas deseadas y un cambio en el área de superficie, debido al cambio en la forma de la arena, dará como resultado el cambio de la cantidad de aglutinante requerida. Los granos redondos tienen una relación baja de área de superficie a volumen y se prefieren para hacer corazones porque requieren la menor cantidad de aglutinante. Las arenas angulares tienen la mayor superficie y requieren más agregados.

1.3.1 Bentonitas como aglutinantes inorgánicos naturales.

Los procesos de unión de arena se caracterizan por la adición de materiales inorgánicos que unen la arena e incluyen moldeo de arena verde, moldeo de arena seca, moldes secos, etc.

El término arena verde se refiere a los moldes de arena que se han activado mediante la adición de agua a la arena aglomerada con arcilla. Las arcillas más comúnmente empleadas en fundición de aluminio son bentonitas. Las bentonitas son formas de un silicato de aluminio hidratado (montmorillonita) que es capaz de expandirse a medida que el agua se absorbe o se contrae a medida que se seca. Hay dos variantes de esta arcilla, en la primera, algunos átomos de aluminio son reemplazados por sodio, lo que le da a la arcilla una carga neta negativa y aumenta su actividad y su capacidad de absorber agua, mientras que en el segundo tipo algunos de los átomos de aluminio son reemplazados por calcio. Las bentonitas confieren un alto grado de plasticidad a la arena pues se contraen al secarse y contribuyen a reducir los efectos causados por las transformaciones que tienen lugar en la sílice. Normalmente el porcentaje de bentonitas usadas varía entre el 2% y el 10% de la cantidad total de la arena. [12]

Cuando el metal líquido se vierte en un molde de arena, se producen gases por la descomposición térmica de los aglutinantes y cualquier otro aditivo empleado y el molde no es suficiente para permitir el escape de estos gases, la presión aumentará dentro del molde, impidiendo el flujo de metal o dañando sus paredes, pero estos gases no siempre son una desventaja, porque la presión del gas

previene la penetración del metal en la arena, por lo tanto, se debe lograr y mantener un equilibrio entre la permeabilidad del molde y la cantidad de gases generados. La permeabilidad se controla por la cantidad, el tamaño y la distribución de los huecos dispersos entre los granos de arena densamente empacados, por lo que comúnmente se recomienda que la arena se haga pasar por una serie de tamices. [12]

La bentonita cálcica se usa en fundiciones de menor temperatura, mientras que la sódica por ser más estable a altas temperaturas, se utiliza en fundiciones de: acero, hierro dúctil y en menor escala para metales no férreos facilitando la producción de moldes complejos. El reciclado de la arena se ve favorecido al utilizar bentonitas sódicas naturales debido a que tienen elevada estabilidad térmica. [11][12]

1.3.2 Control de tolerancias en los modelos.

En el diseño y desarrollo del modelo en arena verde es necesario controlar las tolerancias siguientes:

Contracción (sólido-sólido): dependiendo del metal a fundir. Los modelos deberán tomar en cuenta las medidas finales que tendrá la pieza después de solidificar (diferencia entre las dimensiones del molde y de la pieza colada una vez fría).

Extracción (ángulos de salida): cuando se depone el modelo, es recurrente ensanchar las superficies de salida, al fabricar estas superficies se deben considerar sus dimensiones para la extracción adecuada.

Acabado de la pieza, tolerancia por maquinado: esto se logra puliendo o quitando excedentes de material en las piezas producidas por lo que se debe considerar en el modelo esta disminución del metal.

Distorsión de superficies irregulares: cuando una pieza es de superficie irregular, la contracción por enfriamiento también es variable y genera distorsiones en la pieza, estos efectos deberán ser tomados en consideración en el diseño de los modelos. [9].

1.4 Tratamientos al metal líquido

El tratamiento al metal líquido comprende las operaciones que se realizan al metal líquido, desde el momento de la carga de la aleación en el horno, ya sea por trasvase de aluminio líquido, lingotes o chatarra de aluminio para re fusión, hasta el momento de la transferencia de la aleación líquida para la alimentación de procesos de colada semielaborados o de piezas finales como inyección, etc. El objetivo de estos tratamientos es adecuar las características químicas y físicas del aluminio líquido de acuerdo a las especificaciones dadas por normas para cada

producto terminado. El proceso consiste principalmente en las siguientes etapas: [8]

- Carga de aleación en horno.
- Ajuste de composición química.
- Eliminación de escorias y protección de la aleación.
- Desgasificación.
- Filtrado.
- Refinación de grano.
- Modificación del eutéctico (Al-Si).
- Sedimentación de lodos.
- Transferencia de metal líquido a moldes.

1.4.1 Fundentes y escorificantes.

El término fundente (fluxing) se usa en la práctica industrial para referirse a los aditivos y técnicas empleados para purificar, cubrir, limpiar, proteger, desoxidar y refinar un baño de metal líquido. Los óxidos y otras inclusiones no metálicas pueden formarse en aluminio líquido y podrían incorporar y degradar una fundición saludable. Estas inclusiones pueden originarse a partir de herramientas sucias, arena y otros desechos de moldeo, lodos, lubricantes y residuos líquidos, así como a partir de oxidación de elementos de aleación del metal base. El fundente de la masa fundida facilita la separación y la aglomeración de partículas indeseables de la aleación líquida. Este proceso depende de la temperatura, y debe llevarse a cabo a temperaturas lo suficientemente altas como para mejorar las reacciones químicas y facilitar la separación física de la aleación líquida y la escoria. Los compuestos empleados en los fundentes deben poder cumplir con las siguientes características: deben formar mezclas de baja fluidez y alta fluidez a la temperatura de trabajo, deben descomponerse para generar aniones capaces de reaccionar con las impurezas en la masa fundida, que se separarán de ella. Debido a las diferencias de densidad, deben poder aglomerar los productos no deseados y facilitar su eliminación por medios mecánicos o físicos. [12]

Se emplean diferentes tipos de fluxes en la industria de la fundición según su función. Entre ellos, los principales son: fundentes de cobertura, limpieza, escoriación y refinación. Los fundentes de cobertura están diseñados para usarse en hornos pequeños para proporcionar una barrera física a la oxidación de la masa fundida y la chatarra limpia, retornos de fundición o lingotes cargados. Estos fundentes deben fundirse en la superficie líquida y humedecer la carga. Estos flujos son rentables en condiciones oxidantes, particularmente en aleaciones con altos niveles de Mg. Los fundentes de limpieza son más altos en sales de cloruro (70-75%) para facilitar la humectación de las inclusiones de óxido para una separación más fácil de la masa líquida y mantener las paredes y crisoles libres de

acumulación. Los fundentes de escoria están diseñados para promover la separación del óxido de aluminio (Al_2O_3) de la capa de escoria formada sobre la superficie de la aleación fundida, ya que el lodo, el líquido y el metal fundido generalmente se mezclan en esta capa. Estos fundentes están diseñados para reaccionar con la alúmina en la escoria y recuperar el metal. Contienen compuestos, generalmente fluoruros, capaces de reaccionar exotérmicamente, aumentando así de manera local la temperatura y la fluidez del flux. [12]

Los fluxes de refinación contienen compuestos que se descomponen a la temperatura de trabajo y son termodinámicamente favorables para reaccionar con elementos metálicos indeseables en el metal base y promueven la refinación de grano durante la solidificación. [12]

1.4.2 Contenido de hidrogeno y desgasificación.

El aluminio y sus aleaciones son muy susceptibles a la absorción de hidrógeno en estado líquido debido a su solubilidad a altas temperaturas, como se muestra en la Figura 1, y la afinidad del aluminio por el oxígeno.

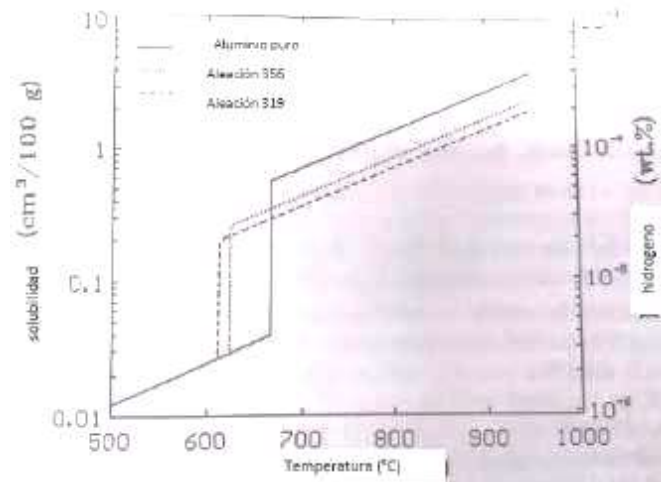
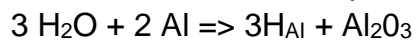


Figura 1. Solubilidad del hidrogeno en aluminio a 1 atmosfera. [12]

La fuente principal de hidrógeno proviene de la humedad de la atmósfera en contacto con el metal líquido, que reacciona con el aluminio:



Dicha reacción se representa como se muestra en la Figura 2.

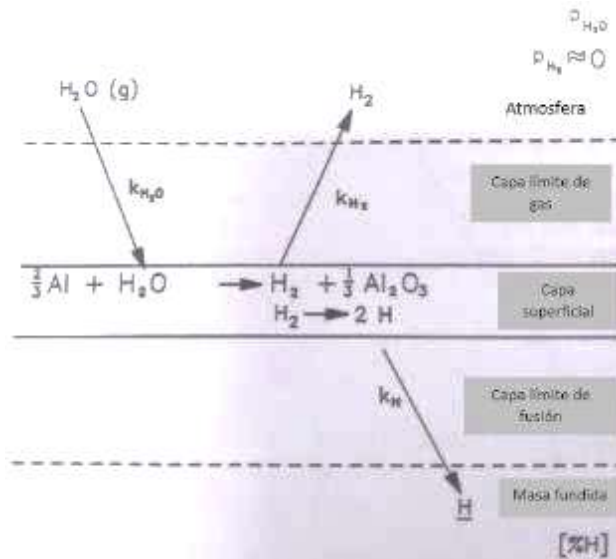


Figura 2. Esquema de la disolución de hidrogeno en el baño de aluminio. [12]

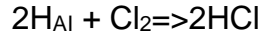
Varias aleaciones de aluminio tienen diferentes sensibilidades a la absorción de hidrógeno y la consiguiente porosidad del gas si no se elimina. El aumento de cobre y silicio reduce la solubilidad del hidrógeno, mientras que el magnesio lo aumenta. Dado que la solubilidad del hidrógeno es significativamente mayor en el estado líquido en comparación con el sólido, habrá un enriquecimiento en el líquido durante la solidificación. Si se supone que no hay difusión sólida y se produce una difusión líquida completa durante la colada. Al final de la solidificación habrá un gran aumento en la concentración de hidrógeno en la pieza. Por lo tanto, incluso cuando el contenido de hidrógeno está por debajo de la solubilidad del líquido a granel durante la solidificación, la concentración en el líquido aumentará y el límite de solubilidad podría excederse, dando como resultado una parte porosa. Varios factores termodinámicos y cinéticos controlan la eliminación de hidrógeno del aluminio fundido. [12]

1.4.3 Eliminación del hidrógeno.

La eliminación de gases es más fácil a temperaturas más bajas y mayores concentraciones. El hidrógeno se elimina mediante:

- Transporte de hidrógeno en la masa fundida a la vecindad de una burbuja de gas inerte por convección y difusión.
- Transporte difusivo a través de la delgada capa límite que rodea la burbuja.
- Adsorción química y posterior desorción de la superficie de la burbuja.
- Difusión de hidrógeno como gas dentro de la burbuja.
- Escape de hidrógeno de la superficie de fusión o en las paredes refractarias.

Posteriormente, la eliminación de hidrógeno dependerá de los coeficientes de transferencia de masa. Se descubrió que la eficacia de la purga depende del tamaño de la burbuja. El uso de los tapones porosos ayuda a mejorar la velocidad al proporcionar pequeñas burbujas. El uso de un impulsor con tapón poroso mejora aún más la velocidad al dispersar las burbujas. Se ha encontrado que la adición de cloro mejora la tasa en algunos casos. Se cree que la velocidad de eliminación no solo se debe a la disminución del coeficiente de transferencia de masa, sino también a la combinación del halógeno con hidrógeno:



Que es termodinámicamente favorable en algunas circunstancias. Pero este proceso a nivel industrial es sumamente peligroso y corrosivo, actualmente está prohibido el uso de cloro.

Cuando el hidrógeno en aluminio fundido no se puede expulsar completamente del producto de fundición a medida que se solidifica, se producirán defectos de porosidad. [12]

La forma más eficiente de realizar la desgasificación del aluminio es hacer burbujear un gas (inerte o activo) en el seno del metal líquido. Durante el tiempo que las burbujas permanecen en el líquido y ascienden hasta la superficie, el H difunde hacia las burbujas debido a la diferencia de presiones parciales entre el aluminio y la burbuja de gas. Los métodos de desgasificación se diferencian de acuerdo a la naturaleza del gas y al método utilizado para su incorporación. La eficiencia del proceso aumenta cuando:

- Las burbujas son pequeñas, como se muestra en la *Figura 3*.
- Mayor superficie interfacial se tiene.
- Más tiempo permanezcan las burbujas en el baño.
- Cuando la burbuja llega a la superficie y no perturba la capa de óxido protectora. [12]

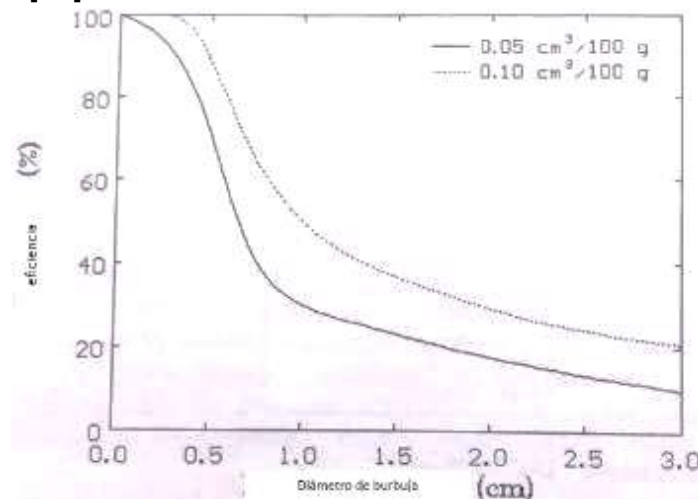


Figura 3. La extracción de hidrogeno es función del tamaño de burbuja, para dos flujos de purga. [12]

1.4.4 Métodos de desgasificación mediante la inyección de un gas.

Lanzas tubulares: Es el método más simple, pero de baja eficiencia. Las burbujas son grandes, con bajo tiempo de residencia. El tratamiento se realiza en hornos, y en general es necesario operar con varias lanzas, moviendo las mismas por el seno del líquido para alcanzar todo el volumen del metal.

Tapones porosos: suele ser una solución intermedia para el tratamiento del metal tanto en hornos como en canales de transferencia. El sistema es de instalación fija y también requiere un número necesario de tapones para alcanzar todo el volumen a tratar.

Inyectores rotativos (rotores): es el método más efectivo. Produce finas burbujas que se dispersan y suben lentamente en el seno del líquido, permitiendo que el hidrógeno tenga más tiempo para reaccionar. Se produce baja turbulencia. [8]

1.5 Características de las aleaciones de aluminio

Las fundiciones fueron el primer mercado importante para las aleaciones de aluminio, después de la comercialización del proceso Hall-Heroult. Al principio las aplicaciones de estas aleaciones base Al se limitaban a piezas de casa, espejos de mano, piezas de peines y cepillos, etc. La demanda de aleaciones de aluminio se ha incrementado en la actualidad, por su relación de buenas propiedades y baja densidad, y en conjunto con la exigencia de la industria como la aeronáutica, aeroespacial, eléctrica y automotriz. La manufactura de piezas por el proceso de fundición, debe cumplir la calidad que el cliente demanda, para ser competitivo en el mercado.

Las aleaciones de aluminio de fundición como de forja coincidieron como un material alternativo en 3 principales mercados:

1.0 Para electricidad, donde se exigieron cables con una baja densidad, con buena resistencia a la corrosión y con una alta conductividad, así como también torres de transmisión e instalación de hardware de fundición, para los cuales el aluminio era adecuado.

2.0 Los pioneros de la automoción buscaron materiales y formas de productos innovadores para diferenciar el rendimiento y la apariencia de sus productos.

3.0 Cuando se tuvo éxito en el vuelo motorizado, para el motor y otras piezas de aluminio fundido fue el comienzo de una estrecha colaboración para lo que se convertiría en la industria aeronáutica y aeroespacial.

Se generó un gran número de aplicaciones en las cuales el aluminio compitió en los mercados, para ello se requirió generar composiciones y condiciones especializadas para satisfacer los requisitos específicos de la ingeniería demandante. La caracterización de las propiedades físicas y mecánicas, así como los resultados de las pruebas de rendimiento fueron las bases para el desarrollo y las continuas mejoras, así como el control de las composiciones.

En los últimos años de la década se ha buscado reducir la huella ecológica que deja la quema de combustibles fósiles y otras alternativas altamente contaminantes, requiriendo una eficiencia energética mayor para que los costos de la gasolina y el petróleo no vayan en aumento. La preocupación ambiental de la sociedad y los gobiernos, la competitividad global y las preocupaciones sobre materias primas, crean iniciativa para tratar reducir el consumo de combustible fósil con alto rendimiento y un costo de los productos, y al tiempo que esto ocurre las aleaciones de aluminio al poseer fuertes características y propiedades, tanto físicas, químicas y mecánicas, se convierten en una gran alternativa para el desarrollo e implementación como material ligero, elevando la eficiencia de los combustibles sin tener que sacrificar seguridad para los usuarios teniéndolo a un menor costo.

1.5.1 Especificaciones de las aleaciones de aluminio.

Las piezas de fundición de aluminio son objeto de numerosas especificaciones y estándares. En los Estados Unidos, las prácticas térmicas y de química de aleaciones están registradas en la Aluminum Association. Las especificaciones y estándares de adquisición son desarrollados y mantenidos por, entre otros, ASTM y agencias militares y federales. Los métodos y estándares de procedimiento son a menudo referenciados. Estos se refieren a la inspección radiográfica y de líquidos penetrantes, a los procedimientos de prueba para la determinación de propiedades químicas, mecánicas y físicas, y a otros procedimientos requeridos.

En muchos casos, las especificaciones están escritas para partes específicas o clases de partes por el comprador. Todas las especificaciones están sujetas a negociación y las excepciones deben ser acordadas entre el productor de fundición y el cliente como parte del proceso de compra. Las especificaciones para las químicas de aleación de aluminio incluyen los efectos de elementos mayores, menores e impurezas:

- Los principales elementos de aleación definen los rangos de elementos que controlan la capacidad de fundición y el desarrollo de propiedades.
- Los elementos de aleación menores controlan el comportamiento de solidificación, modifican la estructura eutéctica, refinan las fases primarias, refinan el tamaño y la forma del grano, promueven o suprimen la formación de fases y reducen la oxidación.
- Los elementos de impureza influyen en la capacidad de fundición y en la forma de fases insolubles que a veces limitan o promueven las propiedades deseadas.

Las concentraciones y relaciones preferidas de elementos mayores, menores e impurezas pueden no estar definidas por las especificaciones de la aleación. Los resultados óptimos no están implícitos en las químicas nominales. La adición de elementos de control de la estructura o combinaciones de elementos pueden estar dentro de los límites de la química cuando no se especifique lo contrario en "Otros elementos cada uno".

Las relaciones estequiométricas para la formación de fase favorecida pueden especificarse, pero también pueden no ser controladas o definidas.

Los límites de concentración permiten el sesgo de la composición para la fundición y el desarrollo de la propiedad. Para obtener la máxima resistencia, se puede maximizar la concentración de elementos que forman fases de endurecimiento. La ductilidad mejorada resulta de estructuras más finas, restringiendo las concentraciones de elementos insolubles y controlando las concentraciones de impurezas en proporciones que favorecen la formación de los constituyentes intermetálicos de menor detrimento. La polarización de la composición se puede especificar en la adquisición de lingotes o puede resultar de ajustes de aleación en la fundición. [3][4]

1.5.2 Designaciones de aleación de aluminio.

Los sistemas de designación y nomenclatura de aleaciones para aleaciones de fundición de aluminio no están estandarizados internacionalmente. Muchas naciones han desarrollado y publicado sus propios estándares. Las empresas individuales también han promovido aleaciones por designaciones de propiedad. En América del Norte, el sistema más utilizado es el desarrollado y mantenido por la Asociación de Aluminio. Las especificaciones generales de contratación

emitidas a través de agencias gubernamentales y asociaciones y sociedades técnicas generalmente hacen referencia a esta nomenclatura.

1.5.3 Sistema de designación de aleación de fundición de la Asociación de Aluminio (AA)

El principal sistema de designación utilizado para aleaciones de aluminio es el de la Asociación de Aluminio (AA) [2]. En esta designación hay cuatro dígitos numéricos, con un punto entre el tercero y el cuarto. El significado de los cuatro dígitos es:

- Primer dígito: constituyentes o aleantes de aleación principal.
- Segundo y tercer dígito: designación de aleación específica (el número no tiene importancia, pero es único)
- Cuarto dígito: proviene de fundición (0) o lingote (1, 2).

Las variaciones en los límites de la composición química que son pequeños requieren un cambio en la designación numérica y este se indica mediante una letra precedente (A, B, C, etc.). La primera versión de una aleación, digamos 356.0, no contiene ningún prefijo de letra o sea no contiene variaciones en CQ; la primera variación tiene una A, por ejemplo, A356.0, la segunda B, por ejemplo, B356.0, y así sucesivamente.

El primer dígito define los elementos de aleación principales del aluminio, y se definen en las siguientes categorías, mostradas en la **Tabla 2**:

Tabla 2. Elementos aleantes del aluminio.

categoría	Elementos de aleación
1xx.x	aluminio puro (99.00% o mayor)
2xx.x	aleaciones de aluminio-cobre
3xx.x	aluminio-silicio cobre y / o magnesio
4xx.x	aluminio-silicio
5xx.x	aluminio-magnesio
7xx.x	aluminio-zinc
8xx.x	aluminio-estaño
9xx.x	otros elementos de aluminio.
6xx.x	series no utilizadas

En las designaciones del tipo 1xx.x, los dígitos segundo y tercero indican el contenido mínimo de aluminio (99.00% o más); estos dígitos son los mismos que

los dos a la derecha del punto decimal en el porcentaje mínimo de aluminio expresado al 0.01% más cercano. Por ejemplo, la aleación 170.0 contiene un mínimo de 99.70% de Al. [4]

En las designaciones 2xx.x a 8xx.x para aleaciones de aluminio, el segundo y tercer dígitos no tienen importancia numérica, pero solo identifican arbitrariamente las aleaciones individuales en el grupo. En todas las designaciones de aleaciones de fundición, el cuarto dígito a la derecha del punto decimal, indica la forma del producto:

- 0 denota de fundición (castings)
- 1 denota lingote estándar
- 2 denota lingotes que tienen rangos de composición más estrechos que los de lingotes estándar. [4]

Entre las aleaciones más usadas de aluminio están:

- Aleaciones Al-Si.
- Aleaciones Al-Mg.
- Aleaciones Al-Cu.

Capítulo 2 Marco **Teórico**

2.1 Descripción de la aleación 535

Las aleaciones Al-Mg son aleaciones binarias monofásicas con resistencia y tenacidad de moderadas a altas. Su característica más importante es la resistencia a la corrosión, incluida la exposición al agua de mar, las atmósferas marinas y una amplia gama de productos químicos y alimenticios.

Las aleaciones de aluminio-magnesio tienen una excelente soldabilidad y se utilizan a menudo en aplicaciones arquitectónicas y decorativas debido a que una apariencia atractiva, ya sea de fundición, maquinado, pulido o anodizado.

En comparación con las aleaciones de aluminio-silicio, todas las aleaciones de aluminio y magnesio requieren más cuidado durante la fusión, el sistema de colada empleado, así como un mayor control en los gradientes de temperatura.

El magnesio en las aleaciones de aluminio aumenta la oxidación. En estado líquido, las pérdidas de magnesio pueden ser mayores y los óxidos de aluminio y magnesio pueden afectar la calidad de la fundición. Los óxidos de aluminio y magnesio se forman con la exposición sin protección a la atmósfera a altas temperaturas del metal líquido. El potencial de inclusiones es especialmente importante porque muchas aplicaciones involucran pulido y acabado superficial fino.

Las aleaciones que contienen menos de 7.0% de Mg se pueden tratar térmicamente, aunque dichos tratamientos se usan comúnmente para estabilizar propiedades que de otra manera podrían cambiar, en algunas composiciones, durante largos períodos de tiempo.

Las aleaciones de aluminio en general son sensibles a oxidarse durante la fusión, pero las aleaciones de Al-Mg como la aleación 535, que contiene hasta 7.5%Mg, genera defectos en piezas fabricadas por fundición denominada bifilm o doble capa de óxido, así como porosidad, dichos defectos producen alteraciones en las propiedades mecánicas de la aleación, aunque la adición de cantidades de berilio entre 0.003-0.01% pueden controlar la oxidación y reducir un poco el contenido de hidrógeno en el metal colado^[2, 3].

Las aleaciones binarias de aluminio-magnesio se usan ampliamente en aplicaciones que requieren un acabado de superficie brillante, excelente respuesta al acabado químico, resistencia a la corrosión y atractivas combinaciones de resistencia y ductilidad.

2.2 Composición química de la aleación 535

En las **Tablas 2 y 3** se muestra la Composición Química según la norma ASTM B26-535, para dos tipos de materia prima 535 lingotes y 535 para fundición ^[4].

Tabla 2. Especificación de Composición Química para la aleación 535.0 como lingote.

Aluminio 535 (lingote)	
Al	Resto
Cu	0.05 Máx.
Fe	*0.20
Si	*0.15
Mn	0.15 – 0.20
Mg	6.9 – 7.5
Ti	0.15 – 0.25
Ca	0.0005 Máx.
Na	0.0005 Máx.
Be	0.004 ± 0.0003
Otros, c/u	0.05
Otros, total	**0.15
*El Fe más el Si no deberá exceder 0.35% en lingote y 0.45% en fundición	
** Redondear al segundo decimal antes de determinarse la suma	

Tabla 3. Especificación de Composición Química para la aleación 535.0 para fundición.

Aluminio 535 (fundición)	
Al	Resto
Cu	0.10 Máx.
Fe	*0.20
Si	*0.25
Mn	0.15 – 0.20
Mg	6.2 – 7.5
Ti	0.10 – 0.25
Ca	0.0005 Máx.
Na	0.0005 Máx.
Be	0.004 Máx.
Otros, c/u	0.05
Otros, total	**0.15
*El Fe más el Si no deberá exceder 0.35% en lingote y 0.45% en fundición	
** Redondear al segundo decimal antes de determinarse la suma	

2.3 Propiedades físicas y químicas de la aleación 535

La **Tabla 4** muestra las propiedades físicas y químicas típicas de la aleación 535, de acuerdo a la norma ASTM B-26-535^[4].

Tabla 4. *Propiedades mecánicas y físicas de la aleación 535.*

Resistencia a la tensión máxima	275.79 MPa (40 000 psi)
Rango promedio en resistencia tensil	262 MPa (38 000 psi)
Resistencia a la tensión mínima	193.05 MPa (28 000 psi)
Resistencia a la cedencia (a 2% de deformación)	124.1 MPa (18 000 psi)
Elongación en 50.8 mm (2")	5%
Límite de endurecimiento a la fatiga	68.95 MPa (10 000 psi)
Resistencia al corte	179.26 MPa (26 000 psi)
Dureza BHN	70
Módulo de elasticidad	71.01×10^3 MPa (10.3×10^6 psi)
Módulo de Poisson	0.3300
Densidad	2.626 g/cm ³ (0.095 lb/in ³)
Conductividad eléctrica	23.21 IACS
Temperatura de fusión: líquido – sólido	629 – 549° C (1165 – 1020° F)

2.4. Defectos

Definición: La norma EN 12258-1: 2012 define "defecto" como una característica de calidad interna o externa que no permite que el producto lleve a cabo la función para la que fue solicitado. Dicha norma europea define en términos generales relacionados con los productos fabricados con aleaciones de aluminio, como el proceso, su muestreo, características generales y pruebas realizadas. Por otro lado, dice que el hecho de que exista un defecto o imperfección en la pieza no significa que esta no pueda realizar adecuadamente la tarea designada. Estas imperfecciones deben ser evaluadas por medio de patrones y escalas adecuados que están basados en normas relacionadas y con ellas decidir si dicha pieza tiene la calidad mínima o necesaria para hacer un uso adecuado de ella.

En la industria del aluminio se producen infinidad de piezas por métodos variados como el molde de arena verde, moldes permanentes y semipermanentes, Die casting ó fundición a alta y baja presión, lost foam, por revestimientos y muchas otras nuevas técnicas alternativas, pero en todos estos métodos de fabricación se pueden producir defectos en la pieza terminal pero en este caso de fundición por moldeo en arena verde se pueden producir por la arena, las placas modelos e incluso las técnicas de moldeo, los sistemas de colada, defectos causados por gases, defectos microestructurales, así como por el vertido del metal fundido al molde

2.4.1 Defectos relacionados con la arena y técnica de moldeo.

Estos defectos pueden estar dados por bajas propiedades físicas y mecánicas de la mezcla de arena, derrames, erosión y superficies que no tienen buen acabado, placas modelo inadecuadas en cuanto a las dimensiones, así como su mala alineación.

- Fisuras en el molde: se pueden agrietar debido a que no se presenta buena resistencia durante el ensamble del molde (cope-drag) y por un vertido turbulento del metal como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Fisura de un molde de arena.

- Sobredimensionamiento: debido a golpes causados a la impresión al momento de cerrar el molde, durante la extracción de la placa modelo o por agentes externos como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Sobredimensionamiento causadas por la falla de una placa modelo.

- Gotas: son debido a pérdidas de arena causadas por un golpe a la impresión en el molde ó un desprendimiento en el corazón causado al cerrar el molde, es decir un faltante a la impresión. Generalmente son causadas en el Cope, como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Gota causada por molde débil en arena verde.

- Escamas de erosión: son causadas por la erosión causada al momento de verter el metal líquido. la arena se afloja por la presión metalostatica del flujo de metal líquido y generalmente se originan en el Drag, como se muestra en la Figura 7.

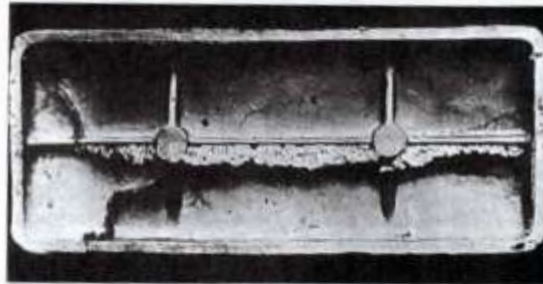


Figura 7. Escamas de erosión

- Desplazamiento: es causado por el desplazamiento de la caja de moldeo, rompimiento de corazones o bien un mal alineamiento en las placas modelo, como se muestra en la Figura 8.

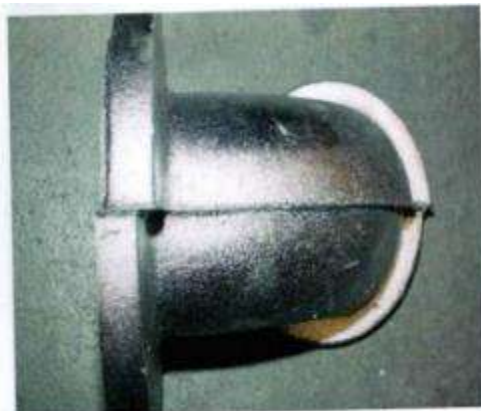


Figura 8. Desplazamiento del corazón que causa deformación en la pieza.

- Arena suelta: desprendimientos de arena que se depositan en partes de la pieza creando huecos y deformaciones, como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Agujero causado por arena suelta.

2.5. Defectos relacionados con el vertido de metal y el sistema de colada

Gota fría: implica una discontinuidad visual y estructural debido a flujos de metal líquido separados, o donde dos o más corrientes se juntan y una de ellas está relativamente fría, parcialmente solidificado y en ocasiones esta lleva una capa de óxido, que a su vez se encuentra con un flujo más caliente. Este defecto característico se presenta como una forma de espiral y generalmente representa películas de óxido. Se presenta en la superficie de colada. Sus causas generalmente son:

- Secciones demasiado delgadas en relación a la fluidez del metal líquido.
- Humedad excesiva y distorsión en el molde.
- Baja permeabilidad de la mezcla de moldeo que crea resistencia.
- Mala evacuación de gas.
- Sistema de colada inadecuado, con tamaños pequeños.
- Interrupción en el vertido de metal líquido.
- Temperatura de colada baja.
- Mucha altura en el momento de la colada, propicia mucha presión metalostática y descenso en la temperatura.
- Baja velocidad de colada.
- Desprendimiento de arena al momento de la colada.
- Inadecuado volumen de metal líquido colado.
- Fugas en el molde.
- Escoria y basura en el metal líquido.

2.6. Defectos por contracción.

Estos defectos se dan durante la solidificación del metal y ocurren debido a la contracción localizada del volumen causada por una insuficiente alimentación de metal líquido generándose estas discontinuidades. Una cavidad cerca de la superficie puede ser una macrocontracción mientras que si es internamente pueden tratarse de rechupes dispersos o microrechupes. Estos defectos se dan en lugares donde la solidificación es más tardada, es decir, en puntos calientes. Se generan debido a la insuficiente alimentación de metal líquido en las zonas interdendríticas, es decir, durante la solidificación, al generarse las ramas primarias de la dendrita, estas van creciendo hasta intersectarse con dendritas aledañas, durante este fenómeno estas dendritas interfieren con la alimentación del metal líquido entre las dendritas y al no tener metal y darse la contracción del volumen se generan huecos o microrechupes.

Este tipo de defectos depende de las condiciones de llenado del molde, baja temperatura de colada, insuficiente metal durante el llenado, propiedades de la aleación como rango de solidificación y porcentaje de contracción, así como la geometría de la pieza a colar, como se muestra en la Figura 10(a) y 10(b).

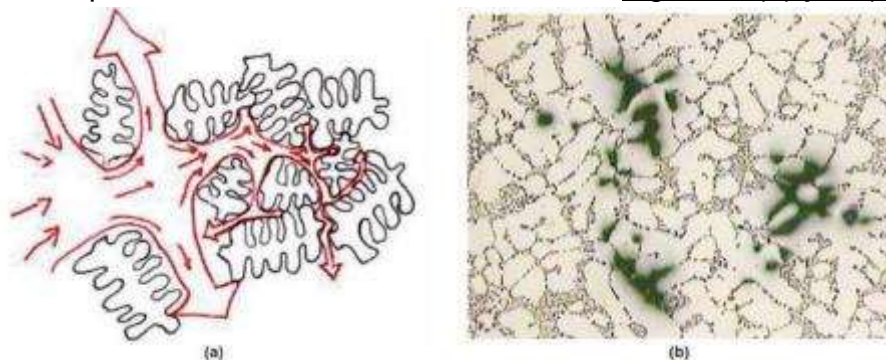


Figura 10. (a) Esquema de interrupción del flujo de metal durante el crecimiento dendrítico. (b) micrografía de microrechupes interdendríticos.

2.7. Defectos por gases.

Estos defectos son causados por la presencia de gas durante la solidificación del metal líquido, formando una porosidad. Estas cavidades pueden formar burbujas o ampollamientos. Estas fuentes de gas pueden incluir hidrógeno disuelto, aire o compuestos orgánicos volátiles, gases causados por la humedad de la arena. Estos defectos afectan al maquinado, el acabado superficial de la pieza final y principalmente las propiedades mecánicas de la aleación.

Los defectos causados por el hidrógeno disuelto en el metal líquido pueden ser minimizados o eliminados, al no elevar mucho la temperatura del metal fundido y aplicando apropiadamente técnicas de desgasificación.

Las principales causas de estos defectos son:

- Insuficiente permeabilidad de la arena.
- Alta humedad de la mezcla de moldeo.
- Zonas duras causadas por apisonado inadecuado.
- Aire atrapado debido a turbulencias durante la colada.
- Aire atrapado por interrupción al colar el metal.
- Alto contenido de hidrógeno disuelto.
- Inadecuada desgasificación.
- Altas temperaturas de colada.

Se pueden observar ejemplos en las Figuras 11 y 12.

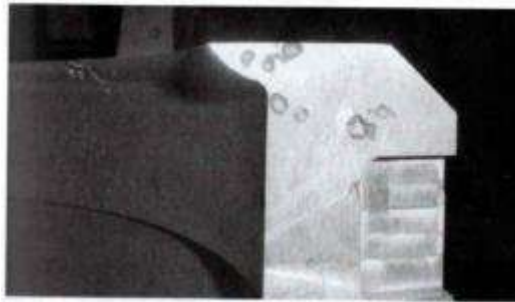


Figura 11. Porosidad causada por atrapamiento de aire en aleación 356.



Figura 12. Poros causados por hidrogeno disuelto en pieza de aluminio.

Capítulo 3
Desarrollo
Experimental

3.1 Mezcla del moldeo en verde.

Para la realización de los moldes se utilizó arena de sílice Oklahoma con granulometría AFS 90-100. La arena contenía bentonitas sódica y cálcica en proporción 40% sódica, 60% cálcica. Posteriormente la mezcla de moldeo se realizó en las humedades establecidas de 3 y 5% de humedad dentro de un molino chileno con capacidad de 200 kg de mezcla.

Para la realización de un par de moldes solicitados para cada experimento, se prepararon 200 kg de mezcla.

3.2 Porcentaje de bentonitas y ensayos mecánicos respectivos.

Con anterioridad se había realizado la experimentación del porcentaje adecuado de bentonitas para una mejor mezcla de arena, así como también los ensayos mecánicos respectivos. Dicha información se encuentra disponible en el documento TESIS “EFECTO DE LAS VARIABLES EN LA FABRICACIÓN DE UNA PIEZA DE FUNDICIÓN CON LA ALEACIÓN 535 POR EL PROCESO DE MOLDEO EN VERDE” [5], por lo que los datos obtenidos en dicha tesis fueron tomados como referencia para presentar las propiedades mecánicas de la mezcla utilizada en estos experimentos.

3.3 Modelo físico.

Se realizaron esquemas del modelo físico con las dimensiones requeridas, para visualizar las medidas de la pieza, como se muestran en las *Figuras 13, 14 y 15*.

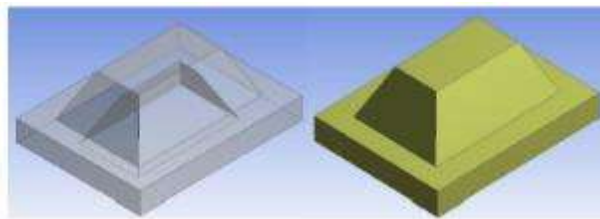


Figura 13. Pieza volumétrica del modelo físico. [5]

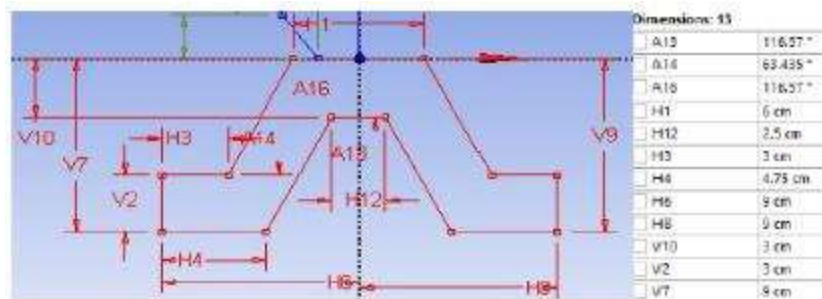


Figura 14. Corte transversal en el plano YZ de la pieza con sus dimensiones [5]

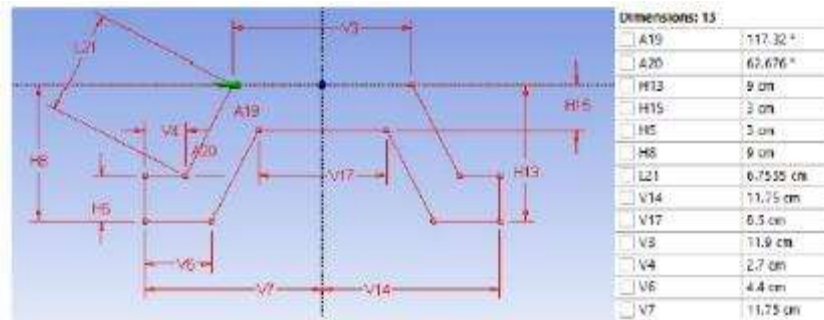


Figura 15. Corte transversal en el plano XZ de la pieza con sus dimensiones [5]
El modelo físico original se fabricó con anterioridad en yeso.

3.4 Placa modelo.

La placa modelo se fabricó con anterioridad. A partir de un modelo físico hecho de yeso, el cual se imprimió en un molde de arena en verde, se colocó un alimentador y la aleación empleada en la colada fue aluminio A-356 dando la forma característica de la placa modelo con la forma de la pieza deseada. La placa modelo se muestra en la Figura 16



Figura 16 Placa modelo

3.5 Cálculo y diseño de los Sistemas de colada.

3.5.1 Alimentadores.

Cuando un metal fundido comienza a enfriarse y solidificar tiende a sufrir 3 tipos de contracciones:

1. Líquido-Líquido: estos dan origen a rechupes dentro de las piezas sólidas.
2. Por solidificación: estos dan origen a rechupes dentro de las piezas sólidas.
3. Sólido-sólido: este tipo se debe de considerar para el diseño y cálculo de los modelos debido a que en la expansión térmica la pieza decrece en sus

dimensiones al disminuir la temperatura en la pieza sólida hasta la temperatura ambiente.

Un alimentador es un recipiente que contiene metal líquido y su función es que se trasladen los rechupes que se forman en la pieza fabricada a este. Dichos rechupes causados por contracciones son trasladados al alimentador y la pieza se obtiene libre de rechupes.

Un rechupe no se puede evitar solamente se puede trasladar al alimentador y dicho rechupe se da por dos tipos de contracciones líquido-líquido y por solidificación.

Para el cálculo de los alimentadores se debe considerar:

- Localización de los tipos de uniones.
- Aplicación del criterio de uniones.
- Cálculo de los módulos de solidificación.
- Localizar las rutas de solidificación.
- Identificar los módulos de solidificación más importantes.
- Calcular el número de alimentadores requeridos en la pieza en función de la distancia de alimentación.
- Calcular los alimentadores.

Condiciones del alimentador que debe cumplir:

- Abierto a la atmósfera.
- La altura del alimentador debe ser mayor a la altura de la pieza.
- El tiempo de solidificación del alimentador debe de ser mayor al de la pieza fabricada.

3.5.2 Cálculo de los módulos de solidificación.

Mediante el software “Ansys” se realizó un modelo 3D y se calculó el área y volumen total de la pieza, también el módulo de solidificación, y es resultado del cociente entre el volumen por el área de la pieza V/A , como se muestran en las Figuras 17, 18 y 19, y en las ecuaciones 1 y 2.

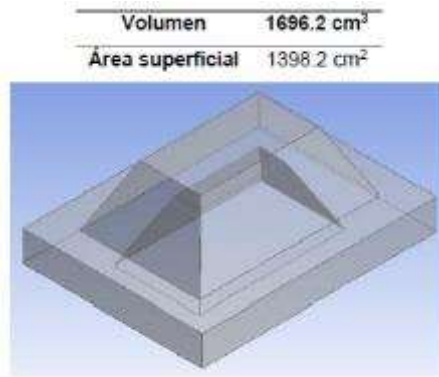


Figura 17. Volumen y área total de la pieza problema. [5]

De la misma manera se calculó volumen y área para los módulos de solidificación 1 y 2.

Módulo de solidificación 1.



Figura 18. Módulo de solidificación 1. [5]

$$MS1 = \frac{V}{A} = \frac{708.82 \text{ cm}^3}{511.49 \text{ cm}^2} = 1.3858 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 1)}$$

Módulo de solidificación 2.

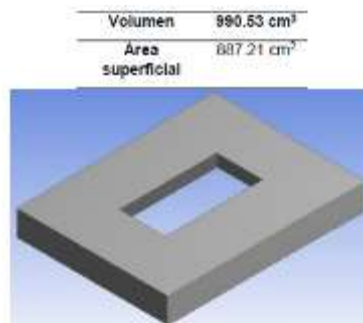


Figura 19. Módulo de solidificación 2. [5]

$$MS2 = \frac{V}{A} = \frac{990.53 \text{ cm}^3}{887.21 \text{ cm}^2} = 1.1164 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 2)}$$

Debido a que el M_{S1} es mayor al M_{S2} , indica que esta parte de la pieza será la que mayor tiempo tarde en solidificar y será esta misma la más propensa a sufrir contracciones y rechupes porque es en este sitio donde debe colocarse el alimentador.

El cálculo del alimentador se realizó de acuerdo a la ecuación de Chvorinov, como se observa en la ecuación 3.

$$MSA = 1.12MSP \frac{KA}{KP} \quad \text{(ecuación 3)}$$

$\frac{KA}{KP} = 1$; Esto indica que el medio de moldeo fue el mismo para la pieza y para el alimentador. Se obtiene M_{SA} de la ecuación 4

$$MSA = 1.12MSP = (1.12)(1.3858) = 1.552096 \quad \text{(ecuación 4)}$$

Módulo de solidificación para un alimentador cilíndrico superior, se obtiene de la ecuación 5.

$$MScilindro = \frac{V}{A} = \frac{\frac{\pi D^2 h}{4}}{\frac{\pi D^2}{4} + \pi D h} \quad \text{(ecuación 5)}$$

“h” representa la altura del alimentador y “D” el diámetro, donde la relación para metales no ferrosos recomendada es: $\frac{h}{D} = 1.5 - 2$.

La relación usada en este caso fue $h/D = 1.5$, donde $h=1.5D$; por lo tanto el módulo de solidificación del cilindro está dado por la ecuación 6:

$$MScilindro = \frac{V}{A} = \frac{\frac{\pi D^2 * 1.5D}{4}}{\frac{\pi D^2}{4} + \pi D * 1.5D} = \frac{D}{4.66} \quad \text{(ecuación 6)}$$

$MSA = MScilindro = 1.552096$

A partir de la ecuación 6 se calcula el diámetro del alimentador despejando a D, como se observa en la ecuación 7 y 8.

$$D_{alimentador} = (4.66)(1.552096) = 7.2327 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 7)}$$

$$Y \text{ como } h = 1.5D = (1.5)(7.2327) = 10.85 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 8)}$$

El alimentador debe tener un cuello, este tiene como objetivo una menor área de contacto con la pieza y así tener mayor facilidad de retirarlo. Este cuello se calcula mediante las ecuaciones 9 y 10:

$$Ln = \frac{D}{3} = \frac{7.2327 \text{ cm}}{3} = 2.4109 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 9)}$$

$$Dn = Ln + 0.2D = 2.4109 \text{ cm} + (0.2)(7.2327) = 3.85744 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 10)}$$

“Ln” representa la altura del cuello y “Dn” el diámetro inferior de cuello. Se eligió un ángulo de salida de 2° para el alimentador por lo que $\theta = 2^\circ$

3.5.3 Cálculo del diámetro con ángulo de salida

El ángulo de salida del alimentador se calculó mediante las ecuaciones 11 y 12.

$$D' = D + 2h(\tan\theta) \quad \text{(ecuación 11)}$$

$$\text{diametro final: } D' = 7.2327 + 2(10.85\text{cm})(\tan(2)) = 7.99 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 12)}$$



Figura 20 Área y volumen del alimentador. [5]

En la Figura 20 se muestran el área total y el volumen del alimentador.

3.5.4 Sistema de colada.

El sistema de colada consiste en un sistema de ductos cuya función es conducir el metal líquido desde el exterior hasta la impresión de la pieza dentro del molde de arena, bajo condiciones controladas de velocidad, gasto y presión.

El metal líquido es vertido en una tina de colada y entra primero por la bajada, la recorre y cae en el colchón, entra por los corredores llenándolos completamente y por último se conduce por las entradas donde comienza a llenar la impresión de la pieza en el molde.

El objetivo de un diseño de sistema de colada y alimentación es obtener una pieza final sana, libre de defectos y rechupes y sin gradientes térmicos.

Relación de colada.

Un sistema presurizado se utiliza para aleaciones líquidas que son muy reactivas con el oxígeno, es decir que son susceptibles a la oxidación como por ejemplo aleaciones base cobre, aluminio y magnesio, principalmente.

Cálculo del peso de la pieza con alimentador según la ecuación 13.

$$W = \rho_{535} * V_t = \left(2.63 \times 10^{-3} \frac{kg}{cm^3}\right) (2250.94 cm^3) = 5.92 kg \quad \text{(ecuación 13)}$$

Cálculo del área inferior de la bajada con la ecuación 14.

$$A = \frac{m}{C * \rho * t * \sqrt{2gH}} \quad \text{(ecuación 14)}$$

Donde:

A= área inferior de la bajada.

M= masa de la pieza + alimentador.

C= coeficiente de descarga.

ρ = densidad del metal.

t= tiempo de colada.

$\sqrt{2gH}$ = velocidad del flujo.

“C” tiene valores predeterminados de 0 a 1, se considera 1 cuando no existen perdidas; en este caso se considerará un valor de C= 0.5.

El tiempo de colada “t” se calcula según la expresión de Mikhailov:

$$t = S^3 \sqrt{W\delta} \quad \text{(ecuación 15)}$$

Donde:

δ = espesor crítico= 30 mm.

W= peso final de la pieza.

En la Tabla 5 se muestran los valores de S establecidos según el espesor crítico de la pieza.

Tabla 5. Coeficiente S según el espesor crítico.

espesor crítico, δ (mm)	S
Hasta 10	1
Hasta 20	1.35
Hasta 40	1.5
Hasta 80 y mas	1.7

Por lo tanto, el tiempo de colada es calculado con la ecuación 16:

$$t = S^3 \sqrt{W\delta} = (1.5^3)(\sqrt{5.92 * 30}) = 8.4315 \text{ segundos.} \quad \text{(ecuación 16)}$$

“H” es la altura desde la parte superior de la bajada hasta la altura superior del ataque y esta depende de la posición de la pieza en el molde.

Como la pieza es llenada por la línea de partición se considera la fórmula que se muestra en la Figura 21.

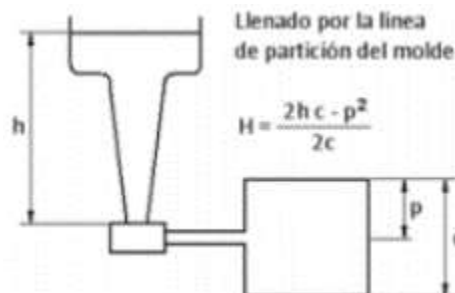


Figura 21. Formula de la altura de la bajada a partir de llenado por LP

Y tomando las dimensiones de la pieza a fabricar se calcula H mediante la ecuación 17.

$$H = \frac{2(19.26*9) - 6^2}{2(9)} = 17.26 \text{ cm.} \quad \text{(ecuación 17)}$$

Entonces a partir de la ecuación 14, se calcula que el área inferior de la bajada como se observa en la ecuación 18.

$$A = \frac{5.92 \text{ kg}}{(0.5)(2.63 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3})(8.4315 \text{ s}) \left(\sqrt{2 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (17.26 \text{ cm})} \right)} = 2.98 \text{ cm}^2 \quad \text{(ecuación 18)}$$

Ya obtenida el área inferior de la bajada se puede calcular el diámetro inferior con la ecuación 19.

$$D_{\text{inferior}} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 1.95 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 19)}$$

Y el área superior se calcula mediante la ecuación 20.

$$D1 = D2 \left(\frac{ht}{hc} \right)^{\frac{1}{4}} = (1.947) \left(\frac{19.26}{3.894} \right)^{\frac{1}{4}} = 2.9 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 20)}$$

Donde ht= altura total de bajada y hc=altura de la tina.

Dimensión del colchón

En la Figura 22 se muestra la relación para el cálculo de las dimensiones del colchón, el cual será para el sistema de colada 1, no presurizado con relación 1:3:6.

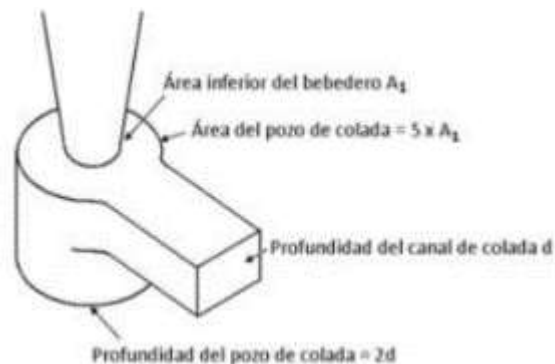


Figura 22. Expresiones para cálculo del colchón o pozo.

Según lo anterior el colchón debe tener las siguientes dimensiones que muestran las ecuaciones 21 y 22.

$$A' = 5A_1 = 5(2.98 \text{ cm}^2) = 14.9 \text{ cm}^2 \quad \text{(ecuación 21)}$$

Como $A' = \frac{\pi}{4} D'^2$, podemos determinar el diámetro del colchón o pozo, resultando:

$$D' = \sqrt{\frac{4A'}{\pi}} = 4.35 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 22)}$$

La elección de la relación del sistema de colada no presurizado 1 elegida fue 1:3:6

A=1 → área inferior de la bajada = 2.98 cm^2

B=3 → área transversal del corredor = 8.94 cm^2 , debido a que son 2 corredores tenemos que serán 4.47 cm^2 por corredor.

C=6 → área transversal de la entrada = 17.88 cm^2 , debido a que son 4 entradas tenemos que serán 4.47 cm^2 por entrada.

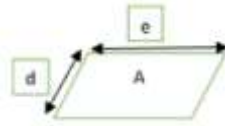


Figura 23 Esquema transversal del corredor.

Para el cálculo del área transversal del corredor y observando la Figura 23 los valores de e y d se calcularon mediante las ecuaciones 23, 24 y 25.

$$A = d * e = 4.47 \text{ cm}^2 \quad \text{(ecuación 23)}$$

Mientras que

$$e = 2d \quad \text{(ecuación 24)}$$

$$4.47 \text{ cm}^2 = 2d^2 \quad \text{(ecuación 25)}$$

Por lo tanto, despejando “d” de la ecuación 25 obtenemos:

$$d = \sqrt{\frac{4.47 \text{ cm}^2}{2}} = 1.505 \text{ cm}$$

Y sustituyendo “d” en el valor de la ecuación 24 obtenemos:

$$e = 2d = 2 * 1.505 = 3.01 \text{ cm}$$

Ya obtenido el valor de las dimensiones del corredor, “d” y “e”, se calcula el valor de la altura del colchón con la ecuación 26.

$$h = 2d = 2 * 1.505 = 3.01 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 26)}$$

Para el cálculo del ángulo de salida para el colchón se utilizó un ángulo de 2° y se utilizó la ecuación 27.

$$Dn' = Dn + 2h * \tan\theta \quad \text{(ecuación 27)}$$

$$Dn' = 4.35 \text{ cm} + 2(3.01) * \tan(2) = 4.56 \text{ cm}$$

Donde Dn' será el diámetro superior del colchón y Dn el diámetro inferior antes calculado, como se muestra en la Figura 24.

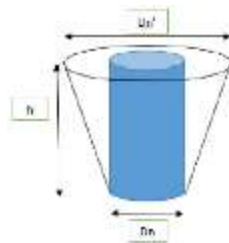


Figura 24. Esquema del aumento de diámetro superior.

Para el cálculo del ángulo de salida para el corredor se utilizó un ángulo de 2° y las ecuaciones 28 y 29.

$$Ln' = Ln + 2h * \tan\theta \quad \text{(ecuación 28)}$$

$$Ln' = 3.01 + 2(1.505) * \tan(2) = 3.115 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 29)}$$

Donde L_n' será la parte superior del corredor y L_n la parte inferior, como se muestra en la Figura 25.

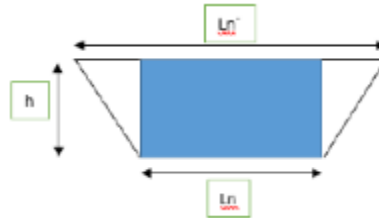


Figura 25. Esquema del aumento en la longitud superior del corredor.

Debido a que el corredor y las entradas tienen las mismas dimensiones el aumento con el ángulo de salida establecido será el mismo para corredor y entradas.

En el caso del sistema de colada no presurizado 2 con relación 1:2:3, se siguió el mismo procedimiento anterior que para el sistema de colada no presurizado 1, como se muestra a continuación.

Dimensión del colchón sistema de colada 2.

En la Figura 26 se muestra la relación para el cálculo de las dimensiones del colchón o pozo, el cual será para el sistema de colada 2, no presurizado con relación 1:2:3.

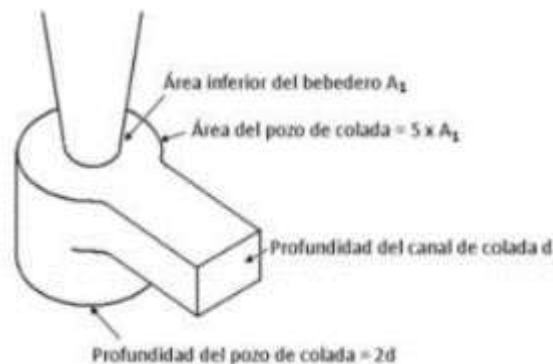


Figura 26. Expresiones para cálculo del colchón o pozo.

El área inferior de la bajada se calculó con la dimensión que tenía la bajada en físico, su diámetro era de 2.1 cm y un área de 3.46cm^2 .

Según lo anterior el colchón debe tener las siguientes dimensiones que muestran las ecuaciones 30 y 31.

$$A' = 5A_1 = 5(3.46\text{cm}^2) = 17.3\text{cm}^2 \quad \text{(ecuación 30)}$$

Como $A' = \frac{\pi}{4} D'^2$, se puede determinar el diámetro del colchón, resultando:

$$D' = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 4.69 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 31)}$$

La elección de la relación del sistema de colada no presurizado 2 elegida fue 1:2:3

A=1 → área inferior de la bajada = 3.46 cm^2

B=2 → área transversal del corredor = 6.92 cm^2 , debido a que son 2 corredores tenemos que serán 3.46 cm^2 por corredor.

C=3 → área transversal de la entrada = 10.38 cm^2 , debido a que son 4 entradas tenemos que serán 2.595 cm^2 por entrada.

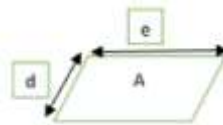


Figura 27. Esquema transversal del corredor y entrada.

Para el cálculo del área transversal del corredor y observando la Figura 27 los valores de e y d se calcularon mediante las ecuaciones 32, 33 y 34.

$$A = d * e = 3.46 \text{ cm}^2 \quad \text{(ecuación 32)}$$

Mientras que

$$e = 2d \quad \text{(ecuación 33)}$$

$$3.46 \text{ cm}^2 = 2d^2 \quad \text{(ecuación 34)}$$

Por lo tanto, despejando d de la ecuación 34 se obtiene:

$$d = \sqrt{\frac{3.46 \text{ cm}^2}{2}} = 1.315 \text{ cm}$$

Y sustituyendo d en el valor de la ecuación 33 se obtiene:

$$e = 2d = 2 * 1.315 = 2.63 \text{ cm}$$

Ya obtenido el valor de las dimensiones del corredor, d y e, se calcula el valor de la altura del colchón con la ecuación 35.

$$h = 2d = 2 * 1.315 = 2.63 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 35)}$$

Para el cálculo del ángulo de salida para el colchón se utilizó un ángulo de 2° y se utilizó la ecuación 36

$$Dn' = Dn + 2h * \tan\theta \quad \text{(ecuación 36)}$$

$$Dn' = 4.69 \text{ cm} + 2(2.63) * \tan(2) = 4.87 \text{ cm}$$

Donde Dn' será el diámetro superior del colchón y Dn el diámetro inferior antes calculado, como se muestra en la Figura 28.

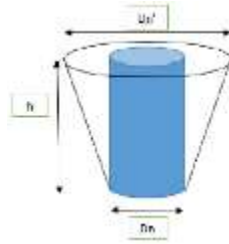


Figura 28. Esquema del aumento de diámetro superior.

Para el cálculo del ángulo de salida para el corredor se utilizó un ángulo de 2° y las ecuaciones 37 y 38.

$$Ln' = e + 2d * \tan\theta \quad \text{(ecuación 37)}$$

$$Ln' = 2.63 + 2(1.315) * \tan(2) = 3.72 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 38)}$$

Donde Ln' será la parte superior del corredor y Ln la parte inferior, como se muestra en la Figura 29.

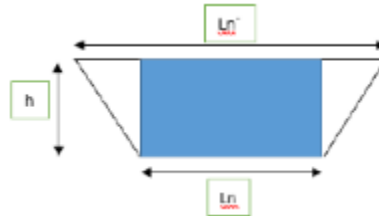


Figura 29. Esquema del aumento en la longitud superior del corredor y entradas.

Para el cálculo del área transversal de la entrada y observando la Figura 3.5.11 los valores de e y d se calcularon mediante las ecuaciones 39, 40 y 41.

$$A = d * e = 2.595 \text{ cm}^2 \quad \text{(ecuación 39)}$$

Mientras que

$$e = 2d \quad \text{(ecuación 40)}$$

$$2.595 \text{ cm}^2 = 2d^2 \quad \text{(ecuación 41)}$$

Por lo tanto, despejando d de la ecuación 41 obtenemos:

$$d = \sqrt{\frac{2.595 \text{ cm}^2}{2}} = 1.14 \text{ cm}$$

Y sustituyendo d en el valor de la ecuación 40 obtenemos:

$$e = 2d = 2 * 1.14 = 2.28 \text{ cm}$$

Para el cálculo del ángulo de salida para la entrada se utilizó un ángulo de 2° y las ecuaciones 42 y 43.

$$Ln' = Ln + 2d * \tan\theta \quad \text{(ecuación 42)}$$

$$Ln' = 2.28 + 2(1.14) * \tan(2) = 2.36 \text{ cm} \quad \text{(ecuación 43)}$$

Donde Ln' será la parte superior del corredor y Ln la parte inferior, como se muestra en la Figura 3.5.13.

3.6 Fabricación de la aleación 535

La aleación 535 se fabricó a partir de lingotes de aluminio puro. Primero se precalentó un lingote completo de aluminio de aproximadamente 5 kilos y ya precalentado se agregó dentro del crisol, una vez este estuviera fundido se agregó el próximo lingote, así hasta completar aproximadamente 20 kilos de metal fundido. Este metal líquido generalmente contiene niveles altos y suficientes de Fe y Cu que son metales difíciles de eliminar durante el reciclaje del aluminio.

Debido a que la materia prima carece de manganeso y magnesio se ajustó la composición para obtener la aleación 535. El manganeso se obtuvo a partir de lingotes de reciclado de latas comerciales que contienen alrededor de 0.7-0.8%Mn.

Se realizó un análisis químico mediante espectrometría de emisión óptica para obtener la composición química del metal fundido y a partir de esto un balance de materia para ajustar los elementos faltantes.

Los reciclados de latas solo aportan un máximo de 0.12-0.15% de magnesio por lo que el restante para un máximo de 7.5% se ajusta con lingote puro de magnesio. Finalmente se sacó una muestra para realizar análisis químico final y verificar la composición química y de ser necesario agregar más latas de bebida, el magnesio no era necesario puesto en cada refusión o preparación de nueva aleación se ajustaba ya para la colada.

En la preparación de la aleación no fue necesaria la desgasificación.

3.7 Mezcla de moldeo y fabricación de moldes.

La mezcla de moldeo se realizó en un molino chileno con capacidad de carga de 200 kg. Se preparó una carga para cada experimento agregando la cantidad suficiente de agua para obtener la humedad deseada, en estos casos la establecida por el punto temper de 3.1- 3.2% de humedad y a 5% de humedad.

La fabricación de los moldes se realizó con los dos sistemas de colada establecidos. En este caso se requería montar dichos sistemas en la placa modelo de manera que fuera relativamente fácil el intercambio y poder colocar el requerido en el experimento. Se montó la placa modelo en una caja y se agregó arena de careo en la superficie de la placa para tener arena libre de grumos cubriendo la pieza, después, se agregó el restante de arena, colocando el alimentador y se compactó con una apisonadora manual hasta obtener la dureza deseada. Se realizaron 2 moldes por experimento.

3.8 Técnica de fusión y tratamientos al metal líquido.

Pre calentamiento: La unidad de fusión usada fue un horno de crisol alimentado por gas L.P, que durante el moldeo se pre calentó con un crisol de capacidad de 30kg de aluminio junto con la materia prima.

Carga del horno: cuando el horno llegó a una temperatura de 800 °C, se agregaron 3 kilos aproximadamente de lingotes de aluminio con la composición aproximada de la aleación 535 al horno y una vez que estos estuvieran fundidos se agregó un fundente de protección contra la oxidación. Posteriormente se agregó el resto del aluminio y más fundente de protección.

Fusión de la aleación 535.

La temperatura del metal líquido se elevaba a aproximadamente 850-860°C con una respectiva capa de fundente protector y una vez alcanzada dicha temperatura, el Mg se ajustó con lingote puro de Mg. El Mg se ajustaba a una composición aproximada de 7.7% y se verificaba con el análisis químico.

Desgasificación: Una vez alcanzada la temperatura de trabajo antes mencionada, se desgasificó el metal líquido con gas argón a partir de una lanza con tapón poroso recubierta con refractario, durante un tiempo de 15 minutos. Durante este proceso se oxidó alrededor de 0.5% o más del magnesio contenido en el metal líquido es por ello que se adicionó una mayor cantidad.

Escorificación: debido a la escoria formada por efecto del escorificante y de la oxidación durante la fusión y desgasificación se retiraba la escoria del metal líquido aproximadamente 50°C antes de la temperatura de vaciado.

Finalmente, se realizó el vaciado a los moldes y se dio un tiempo de solidificación y enfriamiento de 3-4 horas aproximadamente. Una vez transcurrido este tiempo se procedía a desmoldar, retirar arena de la pieza y reciclarla para su posterior uso.

Limpieza de la pieza: se retiró con un cepillo de alambre el restante de arena en la pieza, se cortó el sistema de colada y alimentación con seguetas y discos de desbaste, finalmente, se procedió a una limpieza superficial con una carda.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Composición química.

Generalmente se necesita ajustar la composición química final de una aleación para garantizar que cumple con las normas ASTM asignadas.

Durante el proceso de la fabricación de las piezas se tomaron muestras para analizar la composición química del metal líquido y ajustarla a la composición requerida antes de vaciar el metal a los moldes.

El análisis de la composición química final se realizó con un espectrómetro de emisión óptica. Las *Tablas 6 a 13* muestran las composiciones químicas finales obtenidas en los 8 experimentos realizados.

Tabla 6. Composición química final del experimento 1.

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	%Pb	%Sn
0.180	0.349	0.038	0.167	7.967	0.006	0.0026	0.028	0.017	0.0040	0.0022

Tabla 7. Composición química final del experimento 2.

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	%Pb	%Sn
0.187	0.352	0.039	0.169	7.568	0.006	0.0023	0.029	0.018	0.0038	0.0022

Tabla 8. Composición química final del experimento 3.

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	%Pb	%Sn
0.259	0.369	0.040	0.172	7.323	0.006	0.0023	0.027	0.018	0.0037	0.0023

Tabla 9. Composición química final del experimento 4.

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	%Pb	%Sn
0.126	0.311	0.034	0.182	6.974	0.007	0.0016	0.026	0.020	0.0037	0.0018

Tabla 10. Composición química final del experimento 5.

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	%Pb	%Sn
0.207	0.355	0.039	0.176	7.487	0.007	0.0017	0.029	0.020	0.0041	0.0026

Tabla 11. Composición química final del experimento 6.

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	%Pb	%Sn
0.291	0.408	0.057	0.169	7.986	0.005	0.0016	0.029	0.015	0.0053	0.0026

Tabla 12. Composición química final del experimento 7.

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	%Pb	%Sn
0.218	0.363	0.047	0.180	7.828	0.006	0.0015	0.031	0.019	0.0053	0.0025

Tabla 13. Composición química final del experimento 8.

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Ni	%Zn	%Ti	%Pb	%Sn
0.218	0.363	0.047	0.180	7.810	0.006	0.0015	0.031	0.019	0.0053	0.0025

4.2 Piezas.

Ya limpias y preparadas las piezas se tomaron fotografías a 12 zonas significativas de las cuales se realizó el análisis de imagen en el software image J, para los defectos externos que se presentaran en cada una de estas superficies de las piezas problema.

A continuación, se muestran las áreas para los defectos externos donde fueron tomadas las fotos para cada experimento.

En la Figura 30 se muestra un esquema de la pieza completa y la considerada zona 1 (área en color verde) donde se tomaron las fotografías.

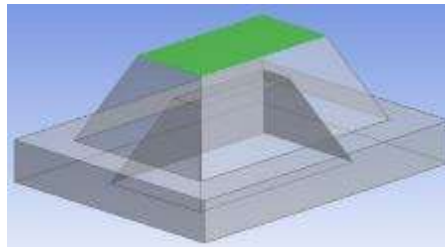



Figura 30. Zona 1 de la pieza.

En la Tabla 14 se muestran las fotografías de las áreas de la zona 1 para cada uno de los experimentos

Tabla 14. Fotografías de la zona 1 para cada experimento.

Experimento 1	Experimento 5
	
Experimento 2	Experimento 6
	
Experimento 3	Experimento 7



En la Figura 31 se muestra un esquema de la pieza completa y la considerada zona 2 (área en color verde), que se muestran como zona “A” y zona “B” donde se tomaron las fotografías.

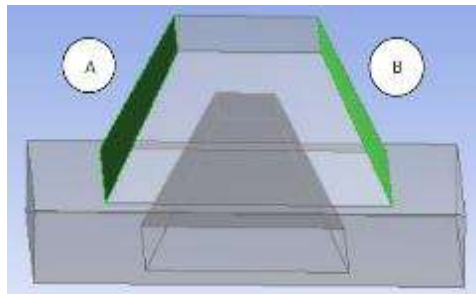














Figura 31. Zona 2 de la pieza.

En la Tabla 15 se muestran las fotografías de las áreas de la zona 2 para cada uno de los experimentos

Tabla 15. Fotografías de la zona 2 para cada experimento.

Experimento 1 zona A	Experimento 1 zona B
Experimento 2 zona A	Experimento 2 zona B

Experimento 3 zona A	Experimento 3 zona B
	
Experimento 4 zona A	Experimento 4 zona B
	
Experimento 5 zona A	Experimento 5 zona B
	
Experimento 6 zona A	Experimento 6 zona B
	
Experimento 7 zona A	Experimento 7 zona B
	
Experimento 8 zona A	Experimento 7 zona B
	

En la *Figura 32* se muestra un esquema de la pieza completa y la considerada *zona 3* (área en color verde), que se muestran como zona “A” y zona “B” donde se tomaron las fotografías.

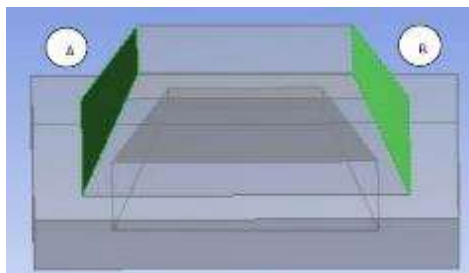








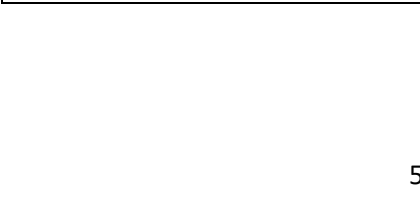
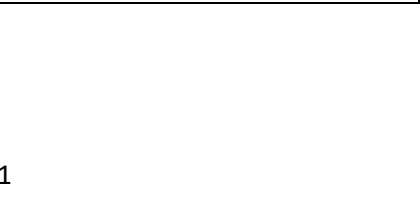
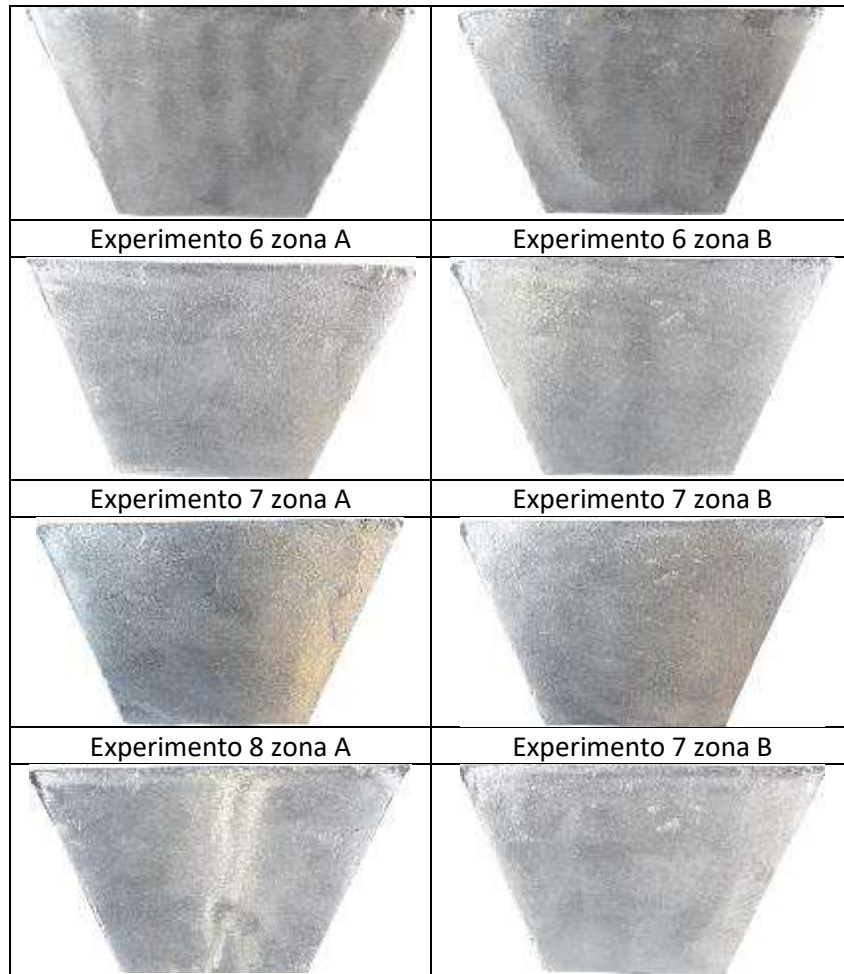


Figura 32. Zona 3 de la pieza.

En la Tabla 16 se muestran las fotografías de las áreas de la zona 3 para cada uno de los experimentos

Tabla 16. Fotografías de la zona 3 para cada experimento.

Experimento 1 zona A	Experimento 1 zona B
	
Experimento 2 zona A	Experimento 2 zona B
	
Experimento 3 zona A	Experimento 3 zona B
	
Experimento 4 zona A	Experimento 4 zona B
	
Experimento 5 zona A	Experimento 5 zona B
	



En la Figura 33 se muestra un esquema de la pieza completa y la considerada zona 4 (área en color verde), donde se tomaron las fotografías.

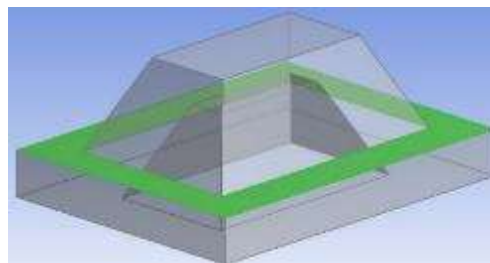
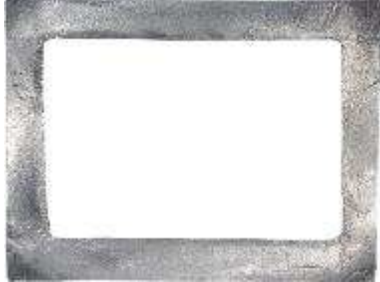









Figura 33. Zona 4 de la pieza.

En la Tabla 17 se muestran las fotografías de las áreas de la zona 4 para cada uno de los experimentos

Tabla 17. Fotografías de la zona 4 para cada experimento.

Experimento 1	Experimento 5
	
Experimento 2	Experimento 6
	
Experimento 3	Experimento 7
	
Experimento 4	Experimento 8
	

En las siguientes 3 figuras, se muestra un esquema de la pieza completa y las zonas consideradas 5, zona 6, zona 7 y zona 8 (áreas en color verde), donde se tomaron las fotografías.

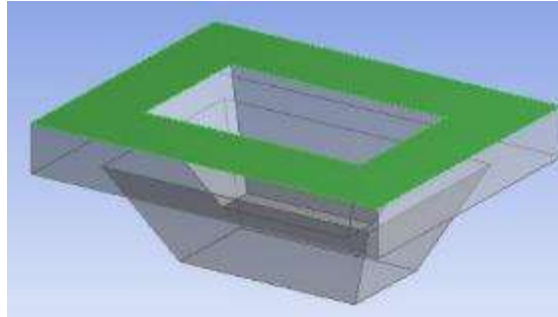


Figura 34. Zona 5 de la pieza.

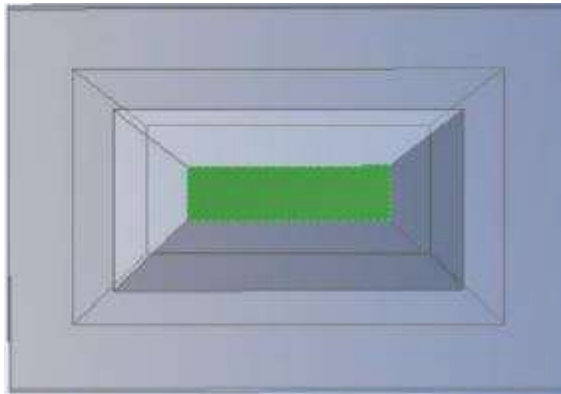


Figura 35. Zona 6 de la pieza.

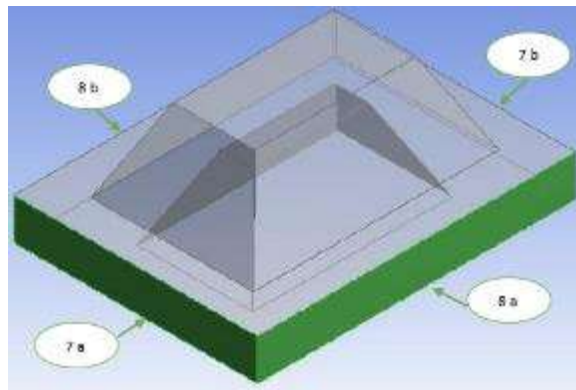


Figura 36. Zona 7 y zona 8 de la pieza.

Para las zonas 5, 6, 7 y 8 se muestran ejemplos e imágenes completas de los resultados obtenidos dentro del ANEXO A “CUANTIFICACION DEL AREA DE DEFECTOS EXTERNOS”.

Debido al ángulo que presentaban algunas zonas y la dificultad que se presentaba para fotografiarlas se decidió descartarlas para su análisis, estas zonas se muestran en un esquema de la pieza representado en la Figura 37.

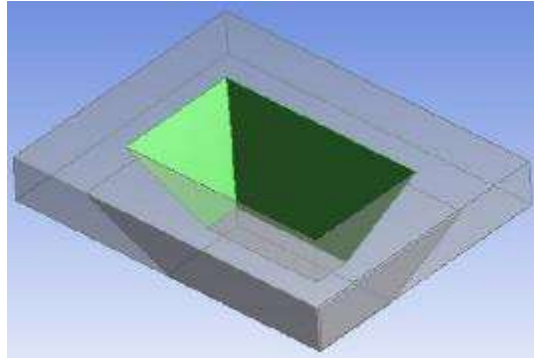


Figura 37. Zona descartada para su análisis

Una vez tomadas las 12 fotografías a cada una de las piezas, se realizó un corte longitudinal y uno transversal para obtener como resultado 4 partes de las cuales se tomaron 2, la superior izquierda y la inferior derecha, como se muestra en la Figura 38 y se muestra la designación de las zonas en donde a cada cara de estas se les realizó el análisis de defectos internos.

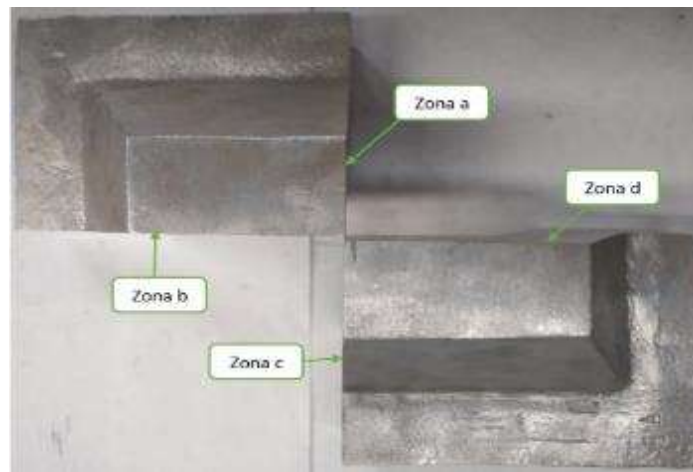
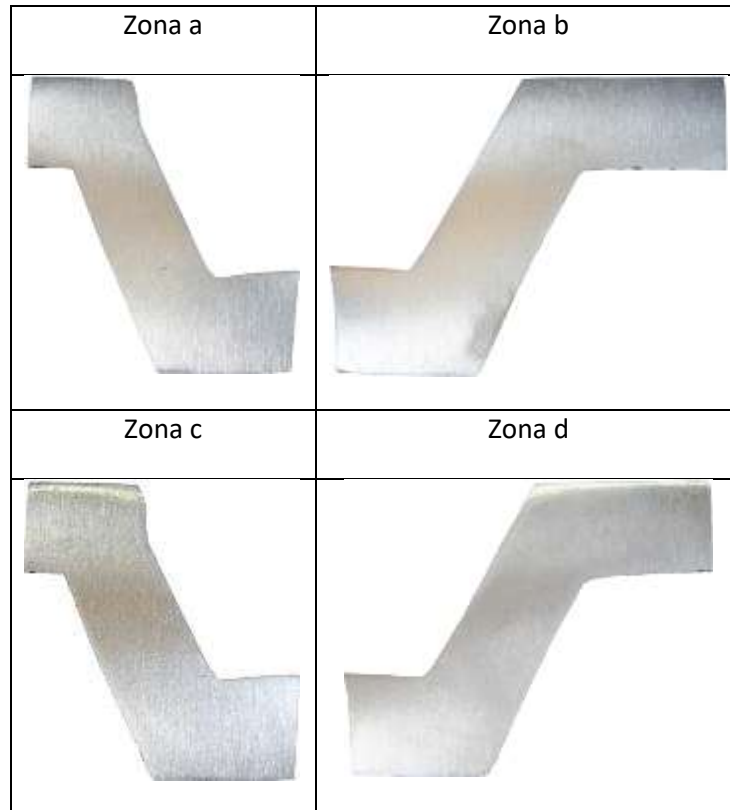


Figura 38. Esquema de corte y zonas de análisis para defectos internos.

Para los defectos internos se tomaron fotografías de la zona a, zona b, zona c y zona d para cada una de las piezas problema y de estas se realizó el análisis para la cuantificación de defectos. En la Tabla 18 se muestra un ejemplo de las fotos tomadas para la pieza 1, el resto de imágenes para todas las piezas se encuentran en el ANEXO B “CUANTIFICACION DEL AREA DE DEFECTOS INTERNOS”.

Tabla 18. Fotografías de las zonas internas para análisis de defectos internos.



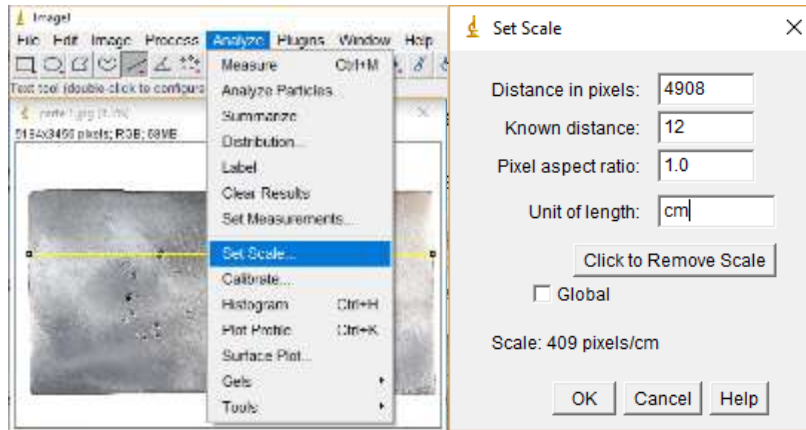
4.3 Análisis de imágenes.

Se tomaron fotografías de 12 zonas de la pieza problema y 4 de las zonas internas para contabilizar los defectos externos causados por la acción de las 3 variables establecidas.

Una vez tomadas las imágenes de cada pieza se procedió a analizar mediante el software image J y contabilizar los defectos superficiales e internos presentes. Debido a que estos defectos se presentan como cavidades las cuales son zonas muy oscuras, fue posible contabilizarlos mediante su color con el software.

Procesos de análisis:

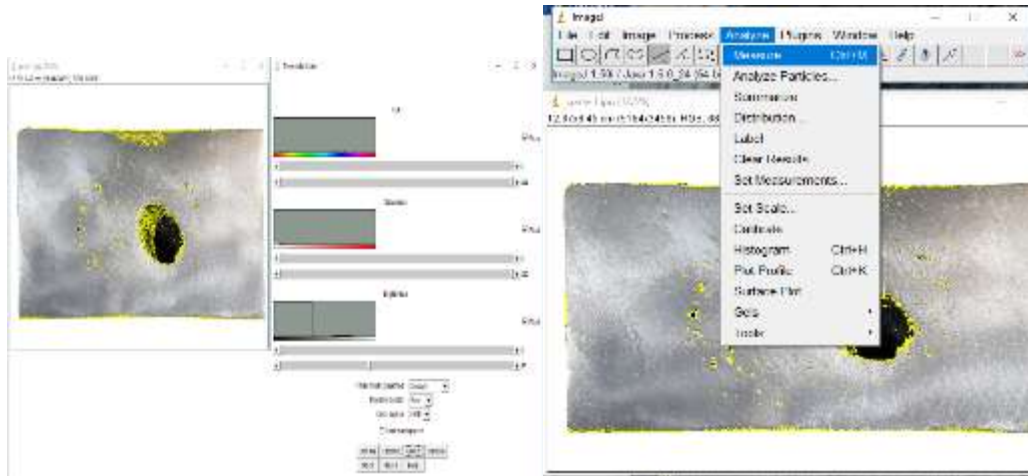
1. Se abrió la imagen en el software y se estableció una escala de referencia según las medidas de la pieza.



2. Una vez establecida la escala se seleccionó en image → adjust → color thresholds. En la imagen se aplicó un filtro que detectó las zonas más oscuras de la pieza y aparece un histograma en el cual se eligió el nivel de las zonas más oscuras que pertenece a los defectos.



3. En el histograma se puede modificar el nivel de brillo en la zona "Brightness" para detectar todos los defectos y una vez detectados se seleccionó y se cuantificó el área total que estos representan.



4. Una vez contabilizados aparece una tabla con el área expresada en cm^2 y es la que se reporta. Como se muestra a continuación:

Results				
File	Edit	Font	Results	
Area	Mean	Min	Max	
1	3.491	94.359	0	97

4.4 Resultados del análisis de imagen.

Una vez analizadas todas las piezas y obtenida el área afectada, la información se presenta en las Tabla 19 a la Tabla 26:

En las Tabla 19 a la Tabla 21, se presentan las áreas afectadas en las zonas externas de las piezas.

Tabla 19. Área afectada piezas 1 a 3, defectos externos.

Zonas de la pieza	Pieza 1 área (cm ²)	replica 1 área (cm ²)	Pieza 2 área (cm ²)	replica 2 área (cm ²)	Pieza 3 área (cm ²)	replica 3 área (cm ²)
1	0.1460	0.0210	0.0300	0.0130	0.9800	0.4620
2a	0.7520	0.7580	0.1360	0.2260	0.8420	2.6750
2b	0.3100	0.0600	0.3670	0.1010	0.9680	0.8760
3a	0.0560	0.0780	0.3670	0.1270	0.9940	0.2500
3b	0.1030	0.2920	0.1850	0.1290	0.2340	0.2670
4	10.286	5.3260	2.1950	1.0460	8.9370	6.9970
5	2.8080	0.8360	0.5630	0.2710	2.1260	4.1820
6	0.5000	2.1180	0.7310	0.9600	0.6570	1.6360
7a	2.0780	2.8180	0.5620	0.1090	0.5250	0.3410
7b	2.0700	1.8030	0.3790	0.9430	1.7460	0.6046
8a	0.8440	3.1680	0.8130	2.2690	0.7470	0.6233
8b	3.8260	1.7340	0.9850	1.8200	1.001	0.4749
total	23.779	19.012	7.313	8.014	19.757	19.389

Tabla 20. Área afectada piezas 4 a 6, defectos externos.

Zonas de la pieza	Pieza 4 área (cm ²)	replica 4 área (cm ²)	Pieza 5 área (cm ²)	replica 5 área (cm ²)	Pieza 6 área (cm ²)	replica 6 área (cm ²)
1	0.696	0.684	0.391	0.026	0.055	0.001
2a	1.526	0.952	0.043	0.391	2.002	1.335
2b	1.256	0.911	0.107	0.539	0.691	0.22
3a	1.829	0.327	0.059	0.071	0.109	0.061
3b	0.802	0.179	0.133	0.576	0.027	0.174
4	4.634	2.763	1.765	0.69	3.336	3.041
5	1.927	3.714	0.939	0.193	1.413	1.934
6	5.295	2.203	0.709	0.157	0.181	0.175
7a	1.169	1.654	0.201	0.327	0.285	0.453
7b	2.32	0.204	0.506	0.39	0.117	0.107
8a	0.706	1.867	0.194	0.306	0.231	0.132
8b	1.036	1.998	0.236	0.08	0.232	0.257
total	23.196	17.456	5.283	3.746	8.679	7.89

Tabla 21. Área afectada piezas 7 y 8, defectos externos.

Zonas de la pieza	Pieza 7 área (cm ²)	replica 7 área (cm ²)	Pieza 8 área (cm ²)	replica 8 área (cm ²)
1	0.0001	0.029	0.219	0.056
2a	0.126	0.818	0.494	0.193
2b	0.205	0.167	0.401	0.299
3a	0.551	0.173	0.686	0.336
3b	0.044	0.035	0.057	0.262
4	2.793	1.194	2.483	0.981
5	2.129	0.439	0.32	2.005
6	0.317	0.116	0.14	0.122
7a	0.04	0.107	0.082	0.073
7b	0.068	0.0799	0.625	0.137
8a	1.701	0.098	0.13	0.135
8b	1.064	0.08	0.163	0.128
total	9.0381	3.3359	5.800	4.727

En las Tabla 22 a la Tabla 25, se presentan las áreas afectadas en las zonas internas de las piezas.

Tabla 22. Área afectada piezas 1 y 2, defectos internos.

Zonas de la pieza	Pieza 1 área (cm ²)	replica 1 área (cm ²)	Pieza 2 área (cm ²)	replica 2 área (cm ²)
1a	0.0256	0.0668	0.0494	0.0504
2a	0.0420	0.1820	0.0212	0.0993
1b	0.0220	0.0199	0.0259	0.0570
2b	0.0630	0.0313	0.2019	0.0600
total	0.1526	0.3000	0.2984	0.2667

Tabla 23. Área afectada piezas 3 y 4, defectos internos.

Zonas de la pieza	Pieza 3 área (cm ²)	replica 3 área (cm ²)	Pieza 4 área (cm ²)	replica 4 área (cm ²)
1a	0.0517	0.0536	0.0530	0.0690
2a	0.0375	0.0740	0.0690	0.1620
1b	0.0192	0.0551	0.0870	0.1050
2b	0.0208	0.0240	0.0730	0.1209
total	0.1292	0.2067	0.2984	0.4569

Tabla 24. Área afectada piezas 5 y 6, defectos internos.

Zonas de la pieza	Pieza 5 área (cm ²)	replica 5 área (cm ²)	Pieza 6 área (cm ²)	replica 6 área (cm ²)
1a	0.0720	0.0290	0.0338	0.0240
2a	0.0226	0.1300	0.0260	0.0520
1b	0.0410	0.0400	0.0150	0.0070
2b	0.0200	0.1440	0.0260	0.0300
total	0.1556	0.3430	0.1008	0.1130

Tabla 25. Área afectada piezas 7 y 8, defectos internos.

Zonas de la pieza	Pieza 7 área (cm ²)	replica 7 área (cm ²)	Pieza 8 área (cm ²)	replica 8 área (cm ²)
1a	0.0210	0.0290	0.0340	0.0080
2a	0.0070	0.0326	0.0660	0.0250
1b	0.0347	0.0170	0.0650	0.0481
2b	0.0170	0.0080	0.0356	0.0022
total	0.0797	0.0866	0.2006	0.0833

La Tabla 26 muestra un resumen de los datos totales de área afectada en externos e internos.

Tabla 26. Resumen del área total afectada para cada pieza, externos e internos.

Pieza	Defectos externos (cm ²)	Defectos internos (cm ²)	réplica	Defectos externos (cm ²)	Defectos internos (cm ²)
1	23.779	0.1526	1	19.012	0.3000
2	7.313	0.2984	2	8.014	0.2667
3	19.757	0.1292	3	19.389	0.2067
4	23.196	0.2984	4	17.456	0.4569
5	5.283	0.1556	5	3.746	0.3430
6	8.679	0.1008	6	7.890	0.1130
7	9.0381	0.0797	7	3.3359	0.0866
8	5.800	0.2006	8	4.727	0.0833

Capítulo 5
Discusión de
resultados

5.1 Diseño factorial.

Los diseños de experimentos son modelos estadísticos que se aplican para saber qué factores o variables influyen en las respuestas de un proceso y si existe dicha influencia de un factor poder cuantificarla. La metodología de estos diseños se basa en la experimentación y si cada experimento se realiza bajo condiciones que no son tan bien controladas, entonces, existirá variabilidad en el proceso. Por el contrario, si las variables son bien controladas, el error de la experimentación será muy pequeño y habrá poca variación en los resultados del experimento.

El objetivo de estos diseños es revelar el efecto de las variables de proceso y de que magnitud afectan.

La metodología del diseño de experimentos estudia cómo variar las condiciones habituales al realizar un proceso para aumentar la probabilidad de encontrar cambios significativos en la respuesta y así obtener un mayor conocimiento del comportamiento de las variables en el proceso de interés.

Los factores de un experimento pueden ser de 2 tipos, cualitativo y cuantitativos. Los factores cualitativos son aquellos que no se pueden controlar, pueden ser tipo y marca de las maquinas, proveedores, el trabajador u operador, sexo (hombre o mujer), etc. Los factores cuantitativos son aquellos que se pueden controlar o establecer como temperatura, la humedad, los aleantes, etc.

Cuando en un experimento se trabaja con más de un factor, se denomina:

Tratamiento: a cada una de las combinaciones de niveles de los distintos factores.

Observación: es una medida en las condiciones determinadas por uno de los tratamientos.

Experimento factorial: es el diseño de experimentos en que existen observaciones de todos los posibles tratamientos.

El objetivo del trabajo fue realizar un diseño factorial de 2 niveles y 3 factores, es decir, un diseño de 2^3 . Debido a que se trata de un diseño factorial 2^3 , se deben realizar 8 experimentos con 3 factores principales donde 2 son cuantitativos y uno cualitativo.

El primer factor cuantitativo es la temperatura teniendo 2 valores para la colada, siendo estos 720 y 765°C.

El segundo factor cuantitativo es el porcentaje de humedad de la mezcla de moldeo y presenta los valores de 3.1 y 5% de humedad respectivamente.

El factor cualitativo se trata del sistema de colada en el que los niveles seleccionados son, no presurizado 1 y no presurizado 2.

Una vez establecidos los tipos de factores, se utilizó el software Mini Tab para obtener los valores de respuesta de cada factor mencionado. En el software se acomodaron los factores con sus respectivos nombres como se muestra en la Tabla 27. Cuando un factor sea cuantitativo se colocarán los niveles alto y bajo con valores numéricos, por ejemplo, la temperatura tendrá como nivel bajo 720°C y como nivel alto 760°C y serán definidos como factores numéricos.

Cuando un factor sea cualitativo es decir no tenga un valor, como el sistema de colada se indicará como texto y sus niveles serán representados como -1 y 1.

Tabla 27. Designación de factores y valores de cada uno para la creación del diseño factorial.

Factor	nombre	tipo	Nivel bajo	Nivel alto
A	T	Numérico	720	760
B	H	Numérico	3.1	5.0
C	SC	texto	-1	1

Donde T corresponde a la temperatura de colada, H al porcentaje de humedad en la mezcla de moldeo y SC corresponde al diseño del sistema de colada. En la columna tipo donde se indica texto se refiere a que el factor es cualitativo, es decir que no tiene valores numéricos que se miden y se representan solamente como -1 (SC no presurizado 1 (1:3:6)) y 1 (SC no presurizado 1 (1:2:3)). Por el contrario, donde se indica numérico el factor es cuantitativo, es decir, tiene un valor numérico específico.

Una vez que se colocaron los factores, se metieron al software todos los valores del análisis de imagen que se muestran de las Tablas 19 a 25.

El análisis de respuesta de cada factor se separó en defectos externos e internos.

5.2 Defectos externos

Como resultado de ingresar los datos de defectos externos al software, este genera una tabla de análisis de varianza, la cual se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28. Análisis de Varianza para defectos externos.

fuer	GL	SC	CM	Valor F	Valor P
T	1	25.67	25.67	4.42	0.069
H	1	22.52	22.52	3.88	0.084
S	1	499.71	499.71	86.02	0.000
T*H	1	23.97	23.97	4.13	0.077
T*S	1	62.61	62.61	10.78	0.011
H*S	1	37.14	37.14	6.39	0.035
T*H*S	1	91.95	91.95	15.83	0.004
Error		46.48	5.809		
Total		810.05			

- Los grados de libertad total (GL) son la cantidad de información en los datos. El análisis utiliza esta información para estimar los valores de los parámetros de población infinita. Los GL totales están determinados por el número de observaciones en la muestra. Los GL de un término muestran cuanta información utiliza el término. Si incrementa el tamaño de la muestra, obtendrá más información sobre la población, con lo cual aumentan los GL totales. Si incrementa el número de términos del modelo, utilizara más información, con lo cual disminuyen los GL disponibles para estimar la variabilidad de los estimados de parámetros. En términos más simples son el número de sujetos en la muestra que pueden tomar un valor, menos el número de sujetos cuyo valor dependerá del que tomen los miembros de muestra que son libres.
- Las sumas secuenciales de los cuadros (SC) son medidas de variación para diferentes componentes del modelo. A diferencia de las sumas ajustadas de cuadrados, las sumas secuenciales de cuadrados dependen del orden en que los términos son ingresados en el modelo. En la tabla análisis de varianza, Mini Tab separa las sumas secuenciales de cuadrados en diferentes componentes que describen la variación que se debe a diferentes fuentes.

Las sumas secuenciales de cuadrados para un término es la porción única de la variación explicada por un término que no ésta explicado por los factores ingresados previamente. Cuantifica la cantidad de variación en los datos de respuesta que se explica por cada término como si fuera agregado secuencialmente al modelo.

La suma total de los cuadrados es la suma del término ´suma de los cuadrados´ y el error en la suma de los cuadrados cuantifica la variación total en los datos.

Mini Tab utiliza las sumas de los cuadrados secuenciales para calcular el valor p de un término. Generalmente, se interpretan los valores p en lugar de las sumas de los cuadrados.

- Los cuadrados medios secuenciales (CM) miden en qué medida una variación explica un término o un modelo. Los cuadrados medios secuenciales dependen del orden en que los términos ingresen en el modelo. A diferencia de las sumas de cuadrados secuenciales, los cuadrados medios secuenciales consideran los grados de libertad.

Mini Tab utiliza los cuadrados medios secuenciales para calcular el valor p de un término. Generalmente, se interpretan los valores p en lugar de los cuadrados medios secuenciales.

- El valor F que aparece en la Tabla 28 Análisis de Varianza para defectos externos, es el valor estadístico de prueba usado para determinar si el término está asociado con la respuesta.

Mini Tab utiliza el valor F para calcular el valor p, que se usa para tomar una decisión acerca de la significancia estadística de los términos y el modelo. Un valor F suficientemente grande indica que el término o el modelo es significativo.

- El valor p es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. Las probabilidades más bajas proporcionan una evidencia más fuerte en contra de la hipótesis nula.

En Mini Tab para determinar si la asociación entre la respuesta y cada término incluido en el modelo es estadísticamente significativa, se comparó el valor p del término con el nivel de significancia para evaluar la hipótesis nula. La hipótesis nula es que no hay asociación entre el término y la respuesta. Por lo general, un nivel de significancia (interpretado como alfa o α) de 0.05 funciona precisamente. Un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir que existe una asociación cuando no hay una asociación real.

Valor $p \leq \alpha$: La asociación es estadísticamente significativa entre la variable de respuesta y el término.

Valor $p > \alpha$: La asociación no es estadísticamente significativamente entre la variable de respuesta y el término. Convendría que vuelva a ajustar el modelo sin el término.

Resumiendo lo anterior, la Tabla 28, indica si los factores elegidos tienen significancia sobre los defectos superficiales de las piezas realizadas, utilizando un valor de significancia de $\alpha=0.05$, se observa que en este caso que el factor “s” sistema de colada solo y sus interacciones tienen la mayor significancia, según el valor p reportado.

Con el programa Mini Tab, también se obtuvo como resultado una tabla de coeficientes codificados para analizar la variabilidad, como se observa en la Tabla 29.

Tabla 29. Coeficientes codificados.

Termino	Efecto	Coefficiente	EE coeficiente	Valor T	Valor P	VIF
Constante		11.651	0.603	19.34	0.000	
T	-2.533	-1.267	0.603	-2.10	0.069	1.00
H	2.373	1.186	0.603	1.97	0.084	1.00
S	-11.177	-5.589	0.603	-9.27	0.000	1.00
T*H	2.448	1.224	0.603	2.03	0.077	1.00
T*S	3.956	1.978	0.603	3.28	0.011	1.00
H*S	-3.047	-1.524	0.603	-2.53	0.035	1.00
T*H*S	-4.795	-2.397	0.603	-3.98	0.004	1.00

- Un efecto es aquel que describe el tamaño y la dirección de la relación que existe entre un término y la variable de respuesta. Mini Tab calcula los efectos de los factores y las interacciones entre factores.

El efecto de un factor representa el cambio pronosticado en la respuesta media cuando el factor cambia del nivel bajo al nivel alto. Los efectos son el doble del valor de los coeficientes codificados. El signo que tiene el efecto indica en qué dirección va la relación entre el término y la respuesta.

- El coeficiente nos describe el tamaño y la dirección que tiene la relación entre un término incluido en el modelo y la variable de respuesta. Para minimizar la multicolinealidad entre los términos, todos los coeficientes están en unidades codificadas.

El coeficiente para un término representa el cambio en la respuesta media asociado con un aumento de una unidad codificada en ese término, mientras los otros términos se mantienen constantes. El signo del coeficiente indica la dirección de la relación entre el término y la respuesta.

El tamaño del coeficiente es la mitad del tamaño del efecto. El efecto representa el cambio en la respuesta media pronosticada cuando un factor cambia de su nivel bajo a su nivel alto.

- Error estándar del coeficiente (EEC) predice la variabilidad entre las estimaciones del coeficiente que se obtendría si las muestras se tomaran de la misma población una y otra vez. El cálculo presupone que el diseño experimental y los coeficientes que se estimarán se mantendrían iguales si se tomara la muestra una y otra vez.

El error estándar del coeficiente se utilizó para hacer la medición de la precisión de la estimación del coeficiente. Cuando menor sea el error estándar, más precisa será la estimación. Al dividir el coeficiente entre su error estándar, se calcula un valor T. Si el valor p asociado con este estadístico T es menor que el nivel de significancia, se concluye que el coeficiente es estadísticamente significativo.

- El valor T mide la relación entre el coeficiente y su error estándar. El valor T se puede utilizar para determinar si se puede rechazar la hipótesis nula. Sin embargo, el valor p se utiliza con más frecuencia, porque el valor umbral para el rechazo de la hipótesis nula no depende de los grados de libertad.
- El factor de inflación de varianza (VIF) indica cuánto es que aumento la varianza de un coeficiente a causa de las correlaciones entre los predictores en el modelo.

El VIF se utilizó para describir cuanta multicolinealidad (es la correlación entre predictores) existe en un modelo. Todos los valores VIF son 1 en la mayoría de los diseños factoriales, lo cual indica que los predictores no tienen multicolinealidad. La ausencia de multicolinealidad simplifica la determinación de significancia estadística.

Con el programa Mini Tab se obtiene otra opción para interpretar los resultados que se obtienen y así analizar más fácilmente por medio de un diagrama de Pareto.

El diagrama de Pareto muestra los valores absolutos de los efectos estandarizados desde el efecto más grande hasta el efecto más pequeño. Los efectos estandarizados son estadísticos T que prueban la hipótesis nula que el efecto es 0. El diagrama muestra una línea que es referencia para indicar cuales efectos son estadísticamente significativos. La línea de referencia para determinar la significancia estadística depende del nivel de significancia α .

Para los defectos externos en la *Figura 39* se muestra el diagrama de Pareto obtenido.

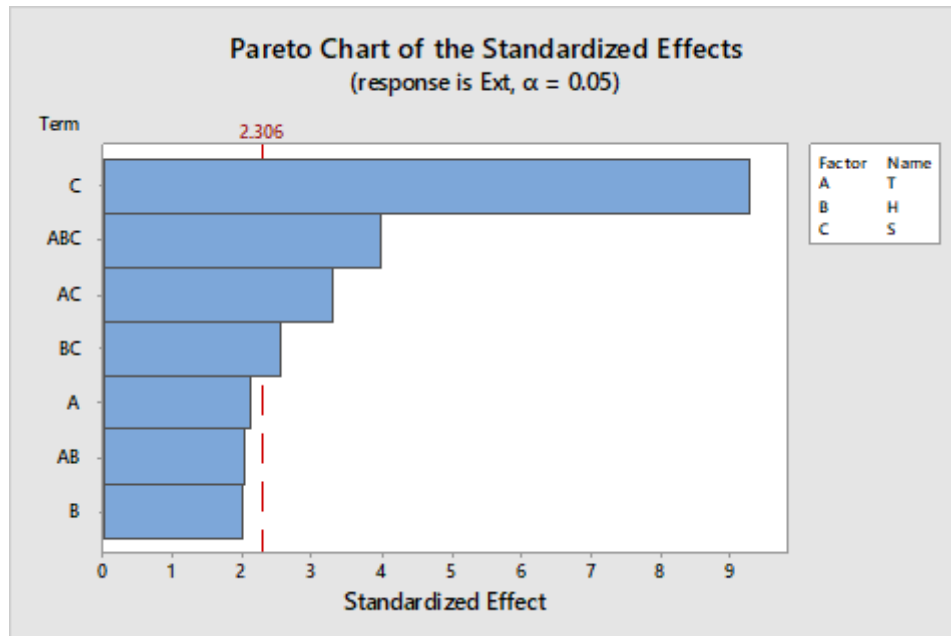


Figura 39. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para defectos externos.

El diagrama de Pareto muestra el valor absoluto de los efectos, con este valor se puede determinar cuáles efectos son grandes, pero no puede determinar cuáles efectos aumentan o disminuyen la respuesta.

Con las tablas se pueden observar los valores numéricos de los efectos de los factores y sus interacciones sobre los defectos finales presentes en la pieza, pero, el diagrama de Pareto hace más sencilla la interpretación y el análisis.

De acuerdo al diagrama de Pareto mostrado en la *Figura 39* se muestra que el cambio de sistema de colada tiene una mayor influencia sobre los defectos que aparecen externamente en la pieza es decir que hacer el cambio de un sistema de colada no presurizado con relación 1:3:6 a uno con relación 1:2:3 tendrá una disminución en la respuesta y serán menores los defectos superficiales, es decir con un sistema de colada más “grande” los defectos aumentan, con las *Tablas 19*

a 21 se puede comprobar que los experimentos 5 a 8 fueron realizados con el sistema 1:2:3 y contienen en general una menor área afectada por defectos externos.

Ahora bien, los factores temperatura y humedad se encuentran por debajo de la línea de referencia en el diagrama de Pareto de la Figura 39, lo que significa que estos factores no tienen influencia en la respuesta, por lo tanto, no son factores que afecten a la generación de defectos externos en las piezas de colada.

Por debajo del sistema de colada se encuentran las tres interacciones que se relacionan con el sistema de colada, T*H*S, T*S y H*S, en ese orden estas tres interacciones tienen una alta influencia en la respuesta es decir que un sistema de colada no presurizado con relación 1:3:6 interactuando con las otras variables provocan la aparición de defectos externos.

El análisis de las interacciones ayuda a saber cuál es la combinación de factores que menor o mayor influencia tiene en la respuesta, es decir, que al final se obtengan los mejores resultados que se buscan para una pieza con menos defectos superficiales y saber que combinaciones afectan para tener más defectos.

Primero se analiza la interacción entre la temperatura y el sistema de colada (T*S) que es la interacción entre factores con el segundo valor más alto con afectación en la respuesta.

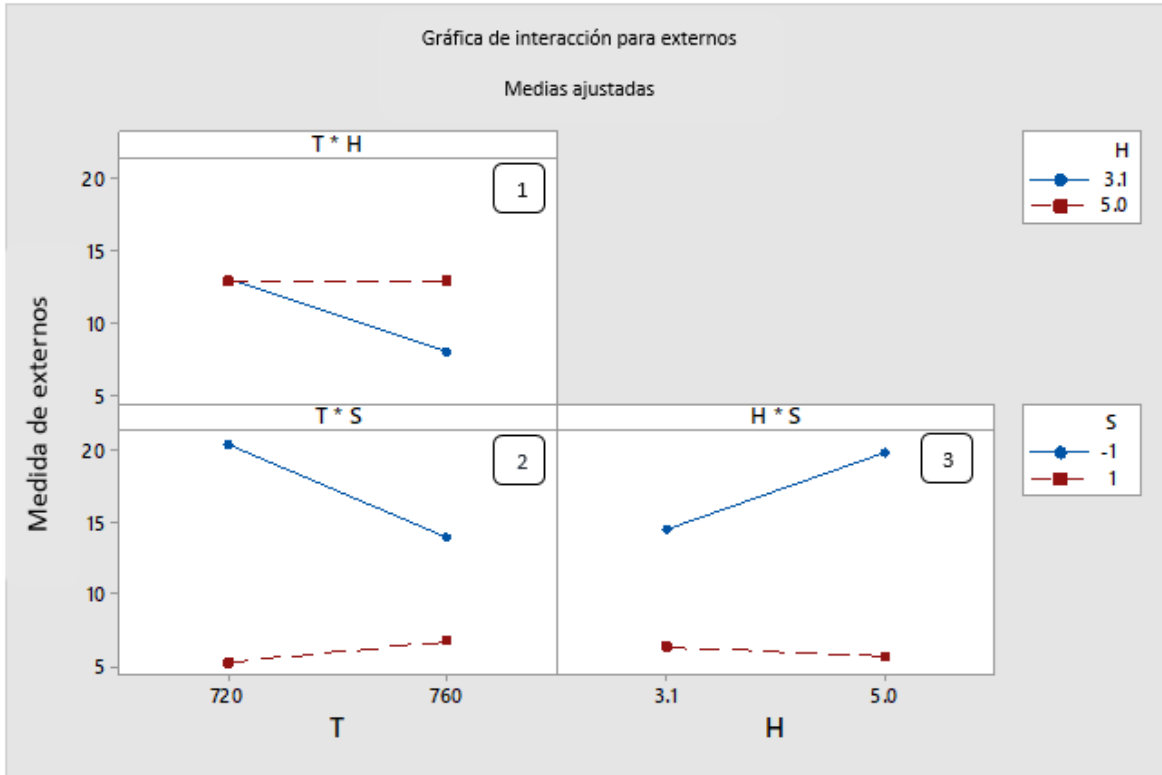


Figura 40. Gráficos de interacción entre factores para defectos externos.

En la Figura 40 gráfico 2, se puede observar que manteniendo un sistema de colada 1:3:6 (-1) el valor en la respuesta es alto a una temperatura de colada de 720°C y este valor disminuye al ir aumentando la temperatura hasta los 760°C, es decir, los defectos disminuyen al colar el metal fundido a esta temperatura se puede observar esto ya que el gráfico tiene una pendiente muy pronunciada, sin embargo; estos valores en la respuesta son superiores comparados con un sistema de colada con relación 1:2:3 (1) que por el contrario los defectos disminuyen a una T de colada de 720°C y los valores en la respuesta no aumentan tan drásticamente hasta los 760° pues la pendiente no es tan pronunciada, sus valores no aumentan mucho, sin embargo, a una temperatura de colada “baja” resulta más ideal para obtener menos defectos superficiales. Dicho lo anterior resulta ideal para la pieza y tener menos defectos superficiales ser fabricada con un sistema de colada no presurizado con relación 1:2:3 (1) y una temperatura de colada en nivel bajo de 720°C, donde los factores tienen una baja afectación sobre los valores de la respuesta, como ejemplo se tiene la pieza 5 y 7.

Ahora bien, la interacción H*S como se observa en la Figura 40 gráfico 3, manteniendo un sistema de colada 1:3:6 (-1), el efecto de los factores en la respuesta aumenta si se cambia la humedad de 3.1% a 5.0%, es decir que los defectos van en aumento si la humedad se va modificando del nivel bajo hasta el

nivel alto como se observa en la pendiente del gráfico. Con el sistema de colada 1:2:3 (1) el valor en la respuesta es muy bajo y los defectos presentes también lo serán, se observa que a una humedad de 3.1% los defectos presentes serán mayores, pero descienden si la humedad en la mezcla aumenta hasta un 5%. Esta disminución en la respuesta es baja ya que la pendiente es casi nula para esta interacción, por lo que podría decirse que la humedad para este sistema de colada no tiene mucha influencia. De la misma manera que la interacción anterior los valores en la respuesta son mucho más altos con el sistema de colada -1 que con el sistema 1, lo que se puede interpretar como que el sistema de colada con una relación más grande 1:3:6 afecta en mayor medida para la creación de defectos externos, esto debido si bien a que el metal líquido entra con menos turbulencia, este tiende a oxidarse más fácilmente, creando mayor cantidad de óxidos que se incrustan en la superficie de la pieza y esta al limpiarse deja pequeñas cavidades. También puede relacionarse los defectos presentes a una mayor cantidad de aire atrapada dentro del sistema al ser más amplio y un mayor tiempo de llenado. En este caso las mejores condiciones para la fabricación de la pieza son un sistema de colada no presurizado con relación 1:2:3 y una humedad del 5% pues esta no afecta en este caso para la creación de defectos, aunque puede usarse la humedad del 3.1% pues esta al tener mayor efecto en los valores de la respuesta, no tiene grandes efectos y esta humedad presenta las mejores propiedades mecánicas en la mezcla de moldeo, en este valor de humedad se encuentra el punto Temper. Como ejemplo se tiene los experimentos 6 y 8 con menor cantidad de defectos, pero diferentes humedades.

La interacción T*H en el diagrama de Pareto de la *Figura 39*, muestra que no es relevante para la modificación en los valores de la respuesta. En la *Figura 40* gráfico 3, se muestra que a una humedad de 5% y modificando la temperatura de colada de nivel bajo a alto no hay modificación en la respuesta, es decir que no hay mayor cantidad de defectos. Por el contrario, a una humedad de 3.1% y una temperatura en nivel alto de 760°C la respuesta disminuye es decir existirá menor cantidad de defectos externos.

Con las interacciones entre los factores se puede hacer la relación que tienen con la formación de defectos y se puede comprobar con el área afectada en cada experimento. Como estas interacciones tienen un papel importante en cada experimento y como se relacionan para formar más o menos defectos en cada experimento.

En el caso de la interacción T*H*S se tendrá un mayor cambio en la respuesta y por lo tanto una mayor cantidad de defectos si el factor "T" se encuentra en el nivel bajo de 720°C, humedad "H" nivel bajo de 3.1% y el sistema de colada "S" no

presurizado 1:3:6, estos factores provocaran que exista una mayor cantidad de defectos externos en la pieza. En este experimento el mayor modificador en la respuesta es el sistema de colada y las mejores condiciones para la fabricación son 720°C, 3.1% de humedad y un sistema no presurizado con relación 1:2:3, esto hará que en la pieza se presenten una menor cantidad de defectos.

5.3 Defectos internos

En la *Tabla 30* se muestran los análisis de varianza que se obtuvo al ingresar los datos de área afectada, para defectos internos, en ella además se muestran, si los factores y las interacciones tienen significancia en los defectos internos presentes en las piezas.

Tabla 30. Análisis de varianza para defectos internos.

fuelle	GL	SC	CM	Valor F	Valor P
T	1	0.007579	0.007579	1.12	0.321
H	1	0.002627	0.002627	0.39	0.551
S	1	0.054040	0.054040	7.98	0.022
T*H	1	0.030000	0.030000	4.43	0.068
T*S	1	0.029133	0.029133	4.30	0.072
H*S	1	0.006370	0.006370	0.94	0.361
T*H*S	1	0.000782	0.000782	0.12	0.743
Error		0.054200	0.006775		
Total		0.184732			

Se utilizó un nivel de significancia α : 0.05 y observando la *Tabla 30* se puede notar que en este caso solo presenta significancia y una alteración sobre la respuesta el sistema de colada, ya que los demás factores se encuentran por encima del nivel de significancia.

Los demás factores y sus interacciones tienen valores “P” muy elevados, lo que causa que existan argumentos a favor de que la hipótesis es nula sobre estos.

El valor $P=0.743$ de la interacción entre los tres factores T*H*S, indica que, si se argumenta que esta interacción influye significativamente en la creación de defectos internos dentro de las piezas, este tendrá un 74.3% de error.

En la *Tabla 31* se muestran los coeficientes codificados obtenidos a partir del software Mini Tab.

Tabla 31. Coeficientes codificados.

Termino	Efecto	Coeficiente	EE del coeficiente	Valor T	Valor P	VIF
Constante		0.2034	0.0206	9.89	0.000	
T	0.0435	0.0218	0.0206	1.06	0.321	1.00
H	-0.0256	-0.0128	0.0206	-0.62	0.551	1.00
S	-0.1162	-0.0581	0.0206	-2.82	0.022	1.00
T*H	0.0866	0.0433	0.0206	2.10	0.068	1.00
T*S	-0.0853	-0.0427	0.0206	-2.07	0.072	1.00
H*S	-0.0399	-0.0200	0.0206	-0.97	0.361	1.00
T*H*S	-0.0140	0.0070	0.0206	0.34	0.743	1.00

La tabla anterior muestra datos con los que evaluando el valor “P”, se puede determinar qué factores influyen en la respuesta y afectan en la creación de defectos internos, para un análisis más sencillo la Figura 41 muestra el diagrama de Pareto para los defectos internos.

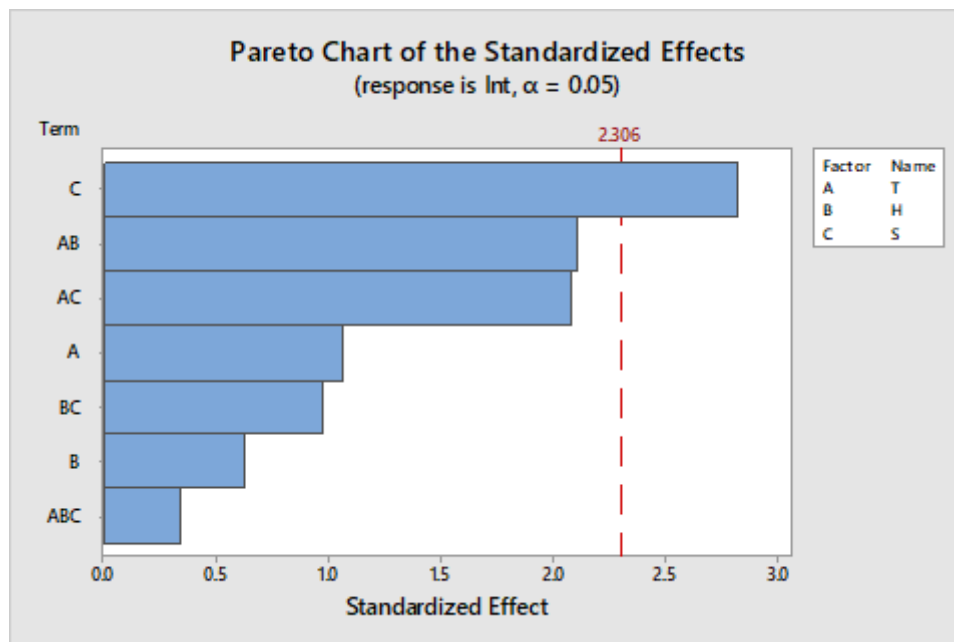


Figura 41. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para defectos internos. El diagrama de la Figura 41 muestra que el único factor que sobrepasa la línea de referencia es el sistema de colada, además, de que ninguna interacción entre

factores o cualquier otro factor son influencia en la respuesta y no crean defectos internos en las piezas. Visualmente se observa que el sistema de colada es un factor que tiene efectos sobre la respuesta, se puede asegurar que interviene en los defectos internos de las piezas sin temor a equivocarse.

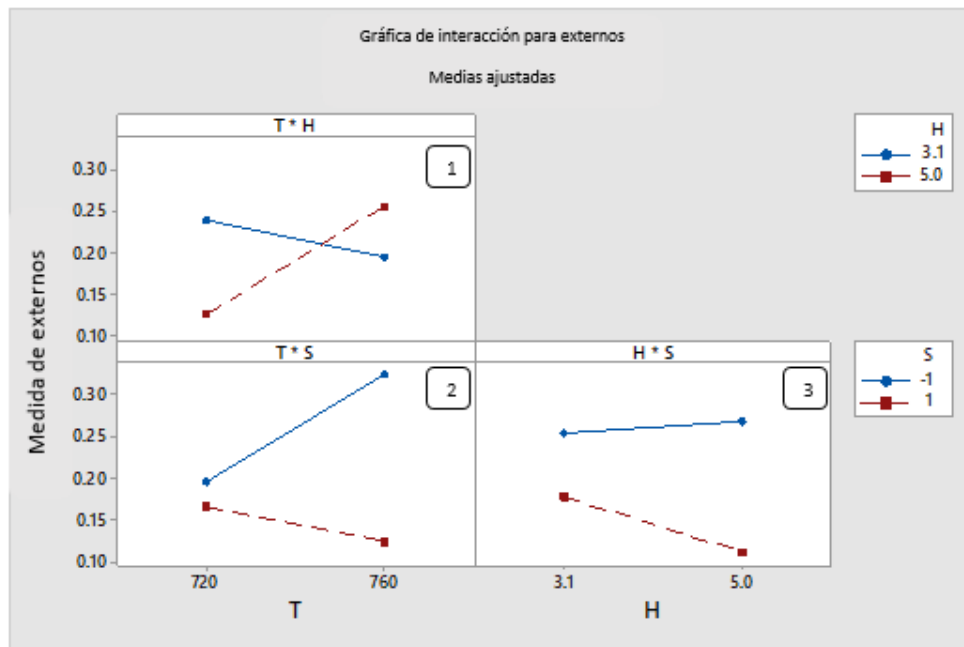


Figura 42. Gráficos de interacción entre factores para defectos internos.

La Figura 42 muestra los gráficos de las interacciones de factores, aunque ninguna de estas es significativa para la alteración de la respuesta, por lo que no son factor para el desarrollo de defectos internos dentro de las piezas problema, pero puede mostrar que condiciones afectan más o menos para la fabricación de las piezas.

Dicho de una forma más sencilla el único factor que afecta en la respuesta y es significativo para la creación de los defectos internos en la pieza es el sistema de colada con relación 1:3:6, que al ser más amplio puede generar más óxidos en el metal al momento del llenado, así como, generar más aire atrapado que desemboque en porosidades pequeñas atrapadas en el seno del metal al momento de la solidificación. Para reducir estos defectos es necesario tener el sistema de colada no presurizado con relación 1:2:3.

5.4 Dificultades en el análisis de imagen.

Para el caso del software image J, resulta complicado el análisis, pues el software llega a detectar zonas sin defectos pero que se encuentran muy oscuras. Para ello en el histograma se mueven los niveles de brillo hacia zonas más claras y los defectos que no se llegaron a cuantificar a partir del “thresholding”, se cuantifican manualmente de la siguiente forma:

1. Se hace zoom en la foto al defecto que se quiere cuantificar y se da click en el recuadro “wand (tracing) tool”, como se observa en la [Figura 43](#).



Figura 43. Ajuste manual de defectos.

2. Para ajustar la tolerancia del brillo del defecto se da doble click en el recuadro “wand (tracing) tool” y se sube hasta rellenar toda el área del defecto. Una vez especificada el área, se cuantifica, como se observa en la [Figura 44](#).

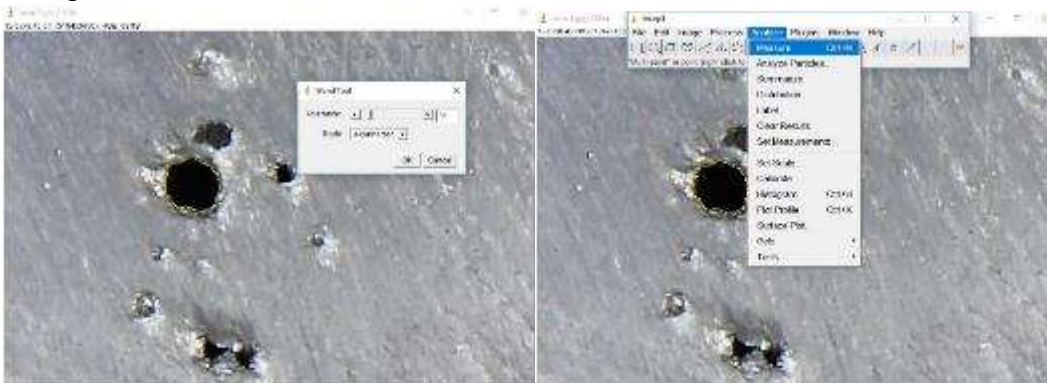


Figura 44. Cuantificación manual del defecto.

Conclusiones

1. El sistema de colada es el factor principal, para promover la mayor cantidad de defectos externos en la pieza.
2. Las interacciones existentes entre el factor sistema de colada con los otros dos factores (T*S y H*S), son promotores de defectos externos en las piezas.
3. La interacción T*H no promueve la formación de defectos externos en la pieza.
4. Solamente el factor de sistema de colada es el mayor promotor de defectos internos.
5. Ninguna de las interacciones entre factores es promotora de defectos internos en la pieza.
6. El diseño en el sistema de colada más grande con relación 1:3:6 es sumamente significativo en la creación de defectos como porosidades y oxidación dentro y fuera de la pieza.
7. La combinación entre factores que obtiene mejores resultados en relación a defectos externos es: baja temperatura de colada 720°C, baja humedad 3.1% y sistema de colada no presurizado con relación 1:2:3, experimento 5.
8. La combinación entre factores que obtiene mejores resultados en relación a defectos internos es, baja temperatura de colada 720°C, alta humedad 5.0% y sistema de colada no presurizado con relación 1:2:3, experimento 7.

Referencias bibliográficas

1. S. Das, The Life Cycle Impacts of Aluminum Body-in-White-Automotive Material, JOM, Vol 52 (No. 8), Aug 2000, p 41–44
2. Aluminum Alloy Castings. Properties, Processes, and Applications. J. Gilbert Kaufman and Elwin L. Rooy. American Foundry Society. ASM International 2004. Chapter 1, p 1-5. Chapter 2 p 7-9, 14-15. Chapter 5 p 47-51, chapter 8 p 120.
3. ASM Handbook 10th Edition, volumen 2, 1990, Properties & Selection nonferrous Alloys & Special Purpose Materials, USA, ASM International Handbook.
4. ASTM B26/B26M-18, 2018, Standard Specification for Aluminum-Alloy Sand Castings, USA, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.ASTM.org
5. Diego Estrada Silva (CDMX 2018), “Efecto de las variables en la fabricación de una pieza de fundición con aleación 535 por el proceso de moldeo en verde” (Tesis de licenciatura, UNAM). Ciudad Universitaria.
6. Casting Defects Handbook: Aluminum & Aluminum alloys. David Neff. American Foundry Society, Schaumburg, IL USA. 2011. P 1 -31.
7. X. Dai, X. Yang, J. Campbell, J. Wood, 2003. Effects of runner system design on the mechanical strength of Al/ 7Si/ Mg alloy castings, Birmingham, U.K. Material science and engineering A354, www.elsevier.com/locate/msea.
8. F. King y C. García Ferrer, (1992), el Aluminio y sus Aleaciones, México D.F., México, Ed. LIMUSA.
9. V.G. Voskobónikov, V.A Kudrin A.M Yásushev, (1982), Metalurgia General, Moscú, Rusia, E.d. MIR
10. N.D Titov, Yu, A. Stepánov, (1981), Tecnología del proceso de fundición, Moscú, Rusia, Ed. MIR.
11. O. Shutze Alonso, (1954), Tratado Practico de Moldeo y Fundición, Barcelona, España, Ed. Gustavo Gill, S.A.
12. George E. Totten, D. Scott Mackenzie, Handbook of aluminum volumen 1, Physical Metallurgy and Processes, New York Basel, Ed. Marcel Dekker Inc.
13. Minitab software estadístico. www.minitab.com.
<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/>
ejemplo: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/model-assumptions/multicollinearity-in-regression/>

anexo a:
cuantificación del
área de defectos
externos

an-a 1. ÁREAS AFECTADAS EN LA PIEZA DEL EXPERIMENTO 1



área afectada (cm^2)	0.1460
--	--------

an-a 1.1 área afectada en la zona 1.



área afectada (cm^2)	0.0210
--	--------

an-a 1.2 área afectada en la zona 1 (replica).



área afectada (cm^2)	0.7520
--	--------

an-a 1.3 área afectada en la zona 2a.



área afectada (cm^2)

0.7580

an-a 1.4 área afectada en la zona 2a (replica).



área afectada (cm^2)

0.3100

an-a 1.5 área afectada en la zona 2b.



área afectada (cm^2)

0.0600

an-a 1.6 área afectada en la zona 2b (replica).



área afectada (cm^2)

0.0560

an-a 1.7 área afectada en la zona 3a.



área afectada (cm^2)

0.0780

an-a 1.8 área afectada en la zona 3a (replica).



área afectada (cm^2)

0.1030

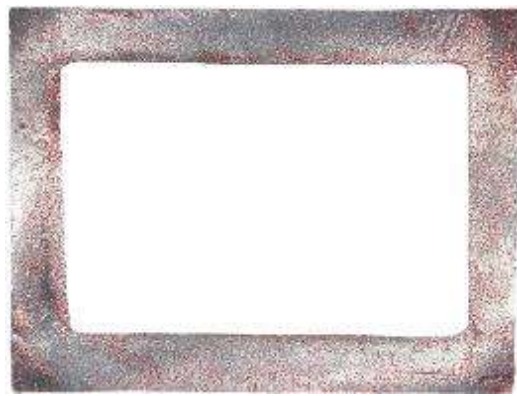
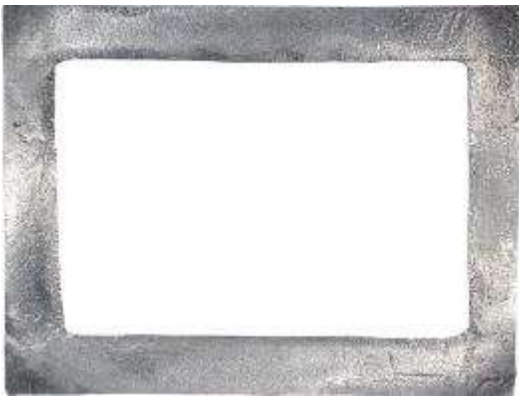
an-a 1.9 área afectada en la zona 3b.



área afectada (cm^2)

0.2920

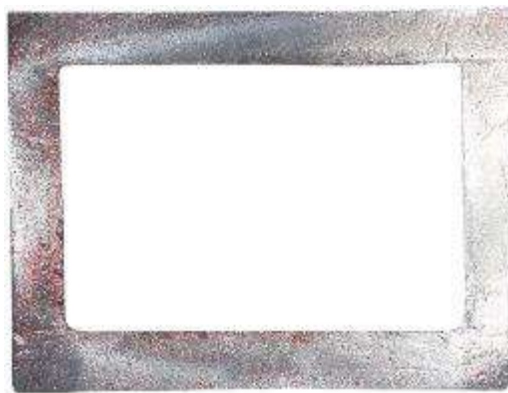
an-a 1.10 área afectada en la zona 3b(replica).



área afectada (cm^2)

10.286

an-a 1.11 área afectada en la zona 4.



área afectada (cm^2)

5.3260

an-a 1.12 área afectada en la zona 4 (replica).



área afectada (cm^2) 2.8080

an-a 1.13 área afectada en la zona 5.



área afectada (cm^2) 0.8360

an-a 1.14 área afectada en la zona 5 (replica).



área afectada (cm^2) 0.5000

an-a 1.15 área afectada en la zona 6.



área afectada (cm^2)

2.1180

an-a 1.16 área afectada en la zona 6 (replica).



área afectada (cm^2)

2.0780

an-a 1.17 área afectada en la zona 7a.



área afectada (cm^2)

2.8180

an-a 1.18 área afectada en la zona 7a (replica).



área afectada (cm^2)

2.0700

an-a 1.19 área afectada en la zona 7b.



área afectada (cm^2)

1.8030

an-a 1.20 área afectada en la zona 7b (replica).



área afectada (cm^2)

0.8440

an-a 1.21 área afectada en la zona 8a.



área afectada (cm^2)

3.1680

an-a 1.22 área afectada en la zona 8a (replica).



área afectada (cm^2)

3.8260

an-a 1.23 área afectada en la zona 8b.



área afectada (cm^2)

1.7340

an-a 1.24 área afectada en la zona 8b (replica).

an-a 2 ÁREAS AFECTADAS EN LA PIEZA DEL EXPERIMENTO 2.



área afectada (cm^2)

0.0300

an-a 2.1 área afectada en la zona 1.



área afectada (cm^2)

0.0130

an-a 2.2 área afectada en la zona 1 (replica).



área afectada (cm^2)

0.1360

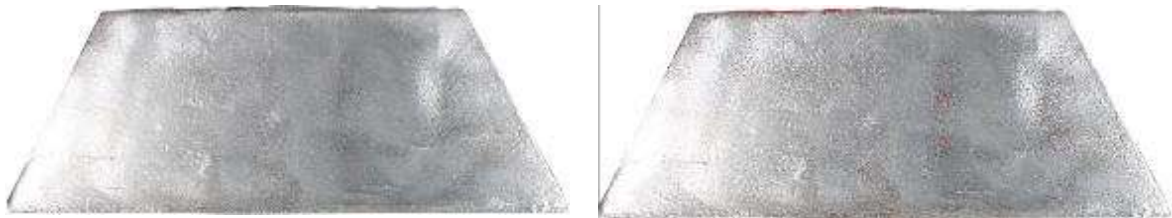
an-a 2.3 área afectada en la zona 2a.



área afectada (cm^2)

0.2260

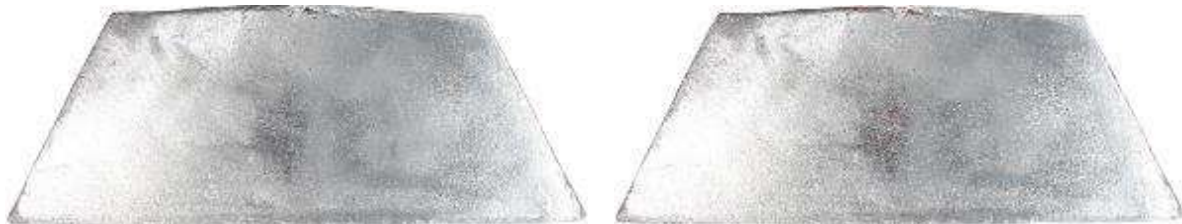
an-a 2.4 área afectada en la zona 2a (replica).



área afectada (cm^2)

0.3670

an-a 2.5 área afectada en la zona 2b.



área afectada (cm^2)

0.1010

an-a 2.6 área afectada en la zona 2b (replica).



área afectada (cm^2) 0.3670

an-a 2.7 área afectada en la zona 3a.



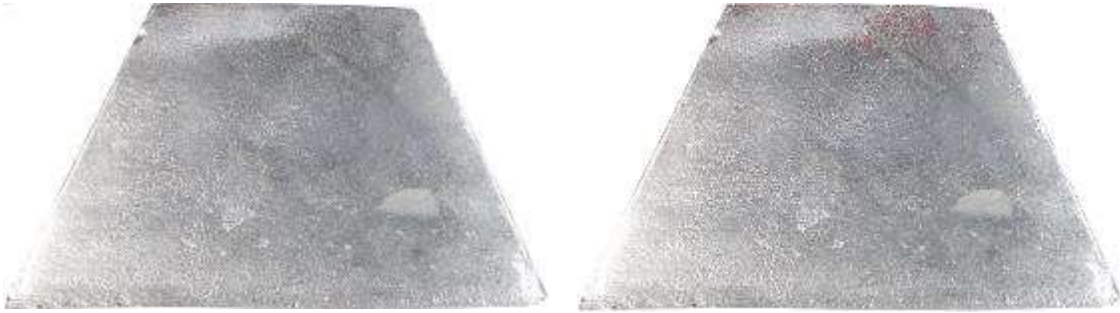
área afectada (cm^2) 0.1270

an-a 2.8 área afectada en la zona 3a (replica).



área afectada (cm^2) 0.1850

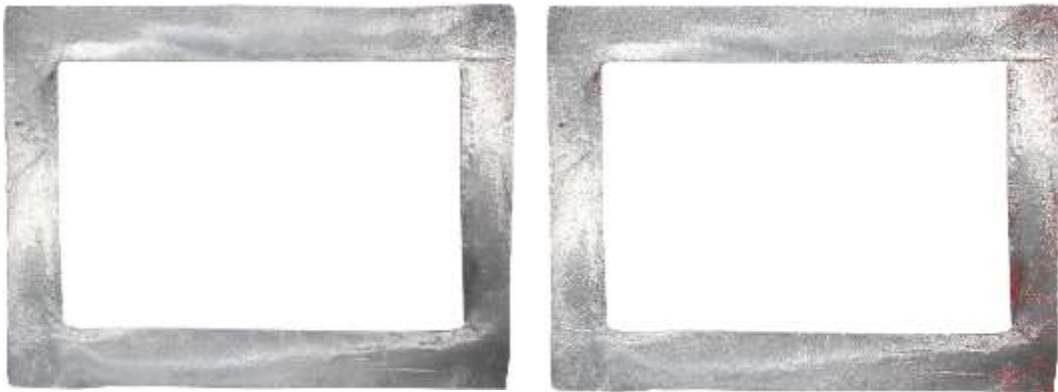
an-a 2.9 área afectada en la zona 3b.



área afectada (cm^2)

0.1290

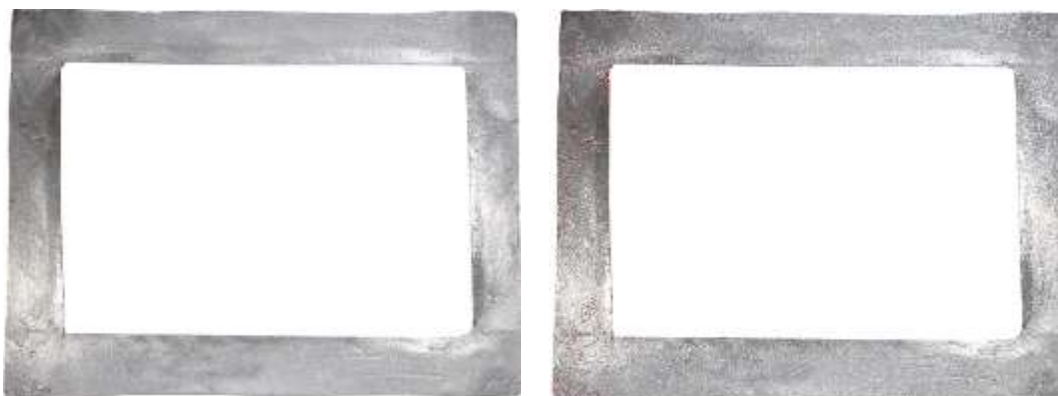
an-a 2.10 área afectada en la zona 3b(replica).



área afectada (cm^2)

2.1950

an-a 2.11 área afectada en la zona 4.



área afectada (cm^2)

1.0460

an-a 2.12 área afectada en la zona 4 (replica).



área afectada (cm^2) 0.5630

an-a 2.13 área afectada en la zona 5.



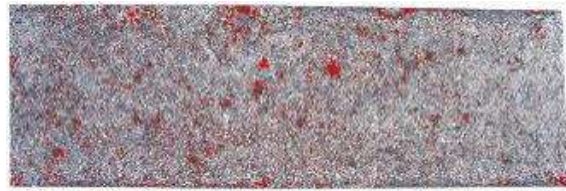
área afectada (cm^2) 0.2710

an-a 2.14 área afectada en la zona 5 (replica).



área afectada (cm^2) 0.7310

an-a 2.15 área afectada en la zona 6.



área afectada (cm^2)

0.9600

an-a 2.16 área afectada en la zona 6 (replica).



área afectada (cm^2)

0.5620

an-a 2.17 área afectada en la zona 7a.



área afectada (cm^2)

0.1090

an-a 2.18 área afectada en la zona 7a (replica).



área afectada (cm^2)

0.3790

an-a 2.19 área afectada en la zona 7b.



área afectada (cm^2)

0.9430

an-a 2.20 área afectada en la zona 7b (replica).



área afectada (cm^2)

0.8130

an-a 2.21 área afectada en la zona 8a.



área afectada (cm^2)

2.2690

an-a 2.22 área afectada en la zona 8a (replica).



área afectada (cm^2)

0.9850

an-a 2.23 área afectada en la zona 8b.



área afectada (cm^2)

1.8200

an-a 2.24 área afectada en la zona 8b (replica).

an-a 3 ÁREAS AFECTADAS EN LA PIEZA DEL EXPERIMENTO 3.



área afectada (cm^2)

0.9800

an-a 3.1 área afectada en la zona 1.



área afectada (cm^2)

0.4620

an-a 3.2 área afectada en la zona 1 (replica).



área afectada (cm^2)

0.8420

an-a 3.3 área afectada en la zona 2a.



área afectada (cm^2)

2.6750

an-a 3.4 área afectada en la zona 2a (replica).



área afectada (cm^2)

0.9680

an-a 3.5 área afectada en la zona 2b.



área afectada (cm^2)

0.8760

an-a 3.6 área afectada en la zona 2b (replica).



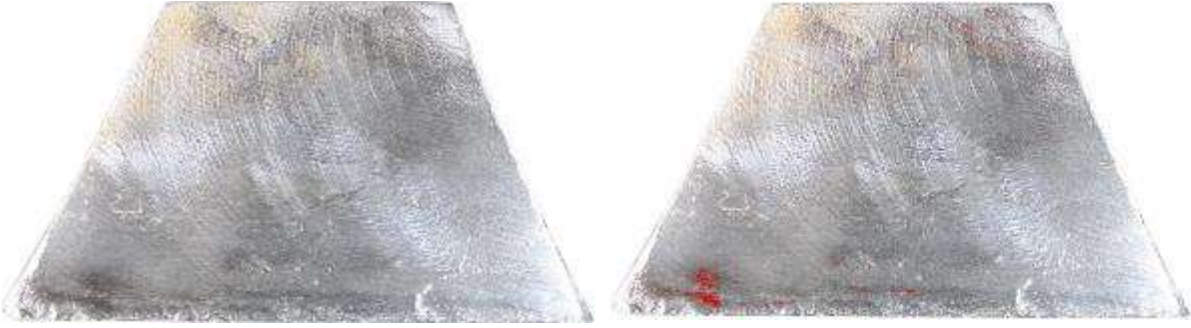
área afectada (cm^2)	0.9940
--	--------

an-a 3.7 área afectada en la zona 3a.



área afectada (cm^2)	0.2500
--	--------

an-a 3.8 área afectada en la zona 3a (replica).



área afectada (cm^2)	0.2340
--	--------

an-a 3.9 área afectada en la zona 3b.



área afectada (cm^2)

0.2670

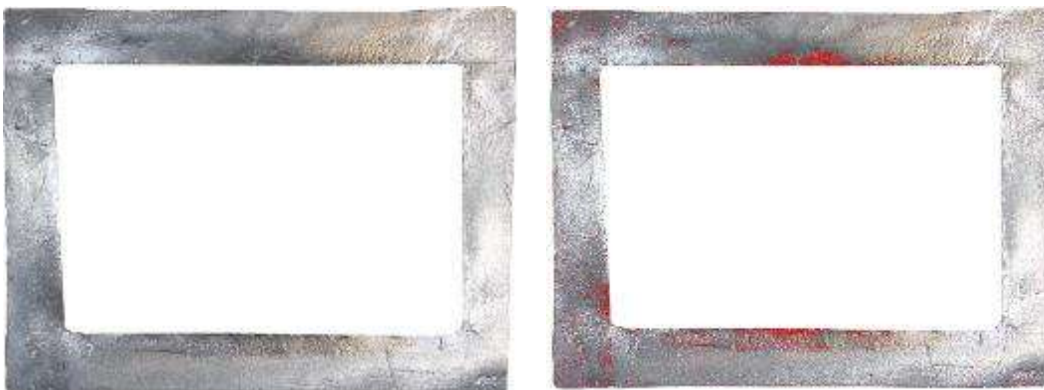
an-a 3.10 área afectada en la zona 3b(replica).



área afectada (cm^2)

8.9370

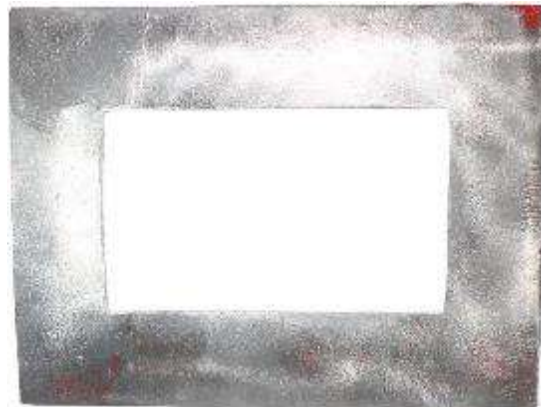
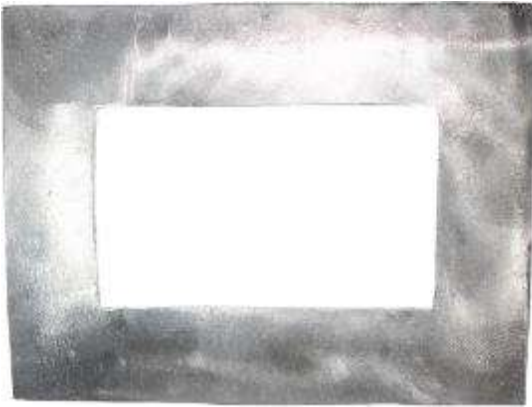
an-a 3.11 área afectada en la zona 4.



área afectada (cm^2)

6.9970

an-a 3.12 área afectada en la zona 4 (replica).



área afectada (cm^2)

2.1260

an-a 3.13 área afectada en la zona 5.



área afectada (cm^2)

4.1820

an-a 3.14 área afectada en la zona 5 (replica).



área afectada (cm^2)

0.6570

an-a 3.15 área afectada en la zona 6.



área afectada (cm^2)

1.6360

an-a 3.16 área afectada en la zona 6 (replica).



área afectada (cm^2)

0.5250

an-a 3.17 área afectada en la zona 7a.



área afectada (cm^2)

0.3410

an-a 3.18 área afectada en la zona 7a (replica).



área afectada (cm^2)

1.7460

an-a 3.19 área afectada en la zona 7b.



área afectada (cm^2)

0.6046

an-a 3.20 área afectada en la zona 7b (replica).



área afectada (cm^2)

0.7470

an-a 3.21 área afectada en la zona 8a.



área afectada (cm^2)

0.6233

an-a 3.22 área afectada en la zona 8a (replica).



área afectada (cm^2)

1.001

an-a 3.23 área afectada en la zona 8b.



área afectada (cm^2)

0.4749

an-a 3.24 área afectada en la zona 8b (replica).

an-a 4 ÁREAS AFECTADAS EN LA PIEZA DEL EXPERIMENTO 4.



área afectada (cm^2)

0.6960

an-a 4.1 área afectada en la zona 1.



área afectada (cm^2)

0.6840

an-a 4.2 área afectada en la zona 1 (replica).



área afectada (cm^2)

1.5260

an-a 4.3 área afectada en la zona 2a.



área afectada (cm^2)

0.9520

an-a 4.4 área afectada en la zona 2a (replica).



área afectada (cm^2)

1.2560

an-a 4.5 área afectada en la zona 2b.



área afectada (cm^2)

0.9110

an-a 4.6 área afectada en la zona 2b (replica).



área afectada (cm^2)

1.8290

an-a 4.7 área afectada en la zona 3a.



área afectada (cm^2)

0.3270

an-a 4.8 área afectada en la zona 3a (replica).



área afectada (cm^2)

0.8020

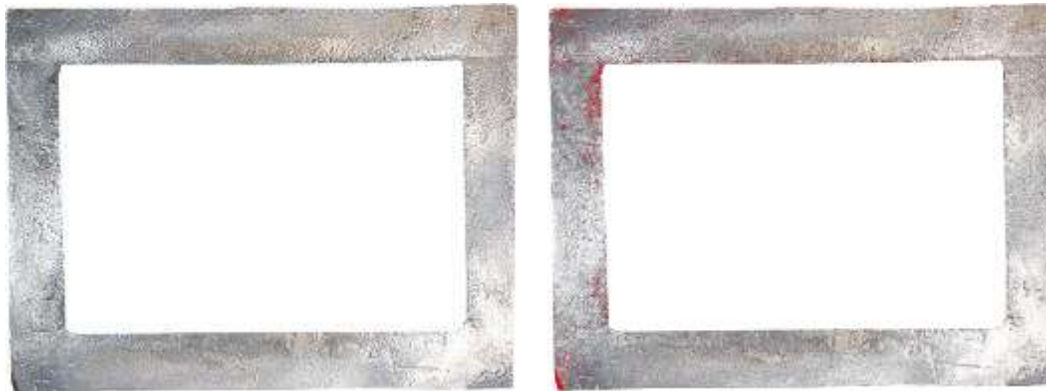
an-a 4.9 área afectada en la zona 3b.



área afectada (cm^2)

0.1790

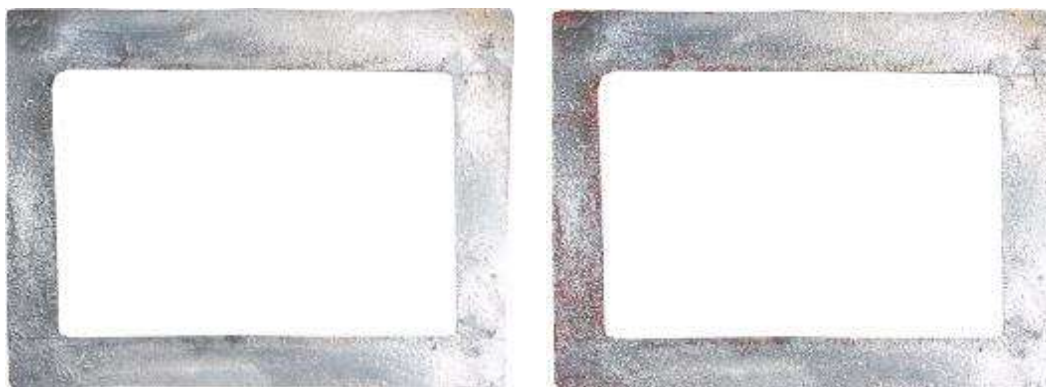
an-a 4.10 área afectada en la zona 3b(replica).



área afectada (cm^2)

4.6340

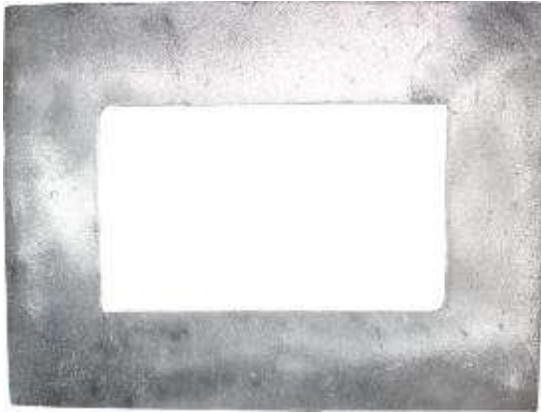
an-a 4.11 área afectada en la zona 4.



área afectada (cm^2)

2.7630

an-a 4.12 área afectada en la zona 4 (replica).



área afectada (cm^2)

1.9270

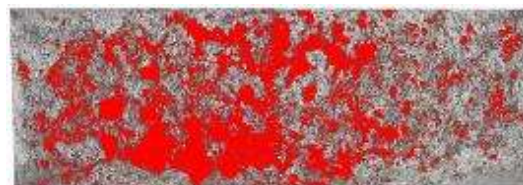
an-a 4.13 área afectada en la zona 5.



área afectada (cm^2)

3.7140

an-a 4.14 área afectada en la zona 5 (replica).



área afectada (cm^2)

5.2950

an-a 4.15 área afectada en la zona 6.



área afectada (cm^2)

2.2030

an-a 4.16 área afectada en la zona 6 (replica).



área afectada (cm^2)

1.1690

an-a 4.17 área afectada en la zona 7a.



área afectada (cm^2)

1.6540

an-a 4.18 área afectada en la zona 7a (replica).



área afectada (cm^2)

2.3200

an-a 4.19 área afectada en la zona 7b.



área afectada (cm^2)

0.2040

an-a 4.20 área afectada en la zona 7b (replica).



área afectada (cm^2)

0.7060

an-a 4.21 área afectada en la zona 8a.



área afectada (cm^2)

1.8670

an-a 4.22 área afectada en la zona 8a (replica).



área afectada (cm^2)

1.0360

an-a 4.23 área afectada en la zona 8b.



área afectada (cm^2)

1.9980

an-a 4.24 área afectada en la zona 8b (replica).

an-a 5 ÁREAS AFECTADAS EN LA PIEZA DEL EXPERIMENTO 5.



área afectada (cm^2)

0.3910

an-a 5.1 área afectada en la zona 1.



área afectada (cm^2)

0.0260

an-a 5.2 área afectada en la zona 1 (replica).



área afectada (cm^2)

0.0430

an-a 5.3 área afectada en la zona 2a.



área afectada (cm^2)

0.3910

an-a 5.4 área afectada en la zona 2a (replica).



área afectada (cm^2)

0.1070

an-a 5.5 área afectada en la zona 2b.



área afectada (cm^2)

0.5390

an-a 5.6 área afectada en la zona 2b (replica).



área afectada (cm^2)

0.0590

an-a 5.7 área afectada en la zona 3a.



área afectada (cm^2)

0.0710

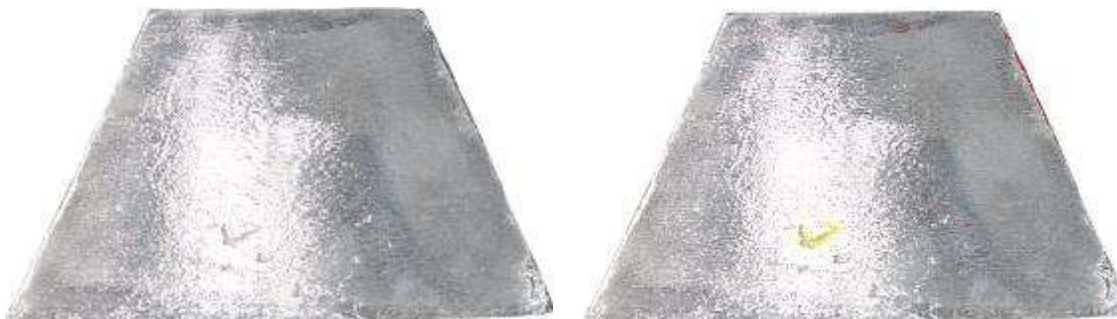
an-a 5.8 área afectada en la zona 3a (replica).



área afectada (cm^2)

0.1330

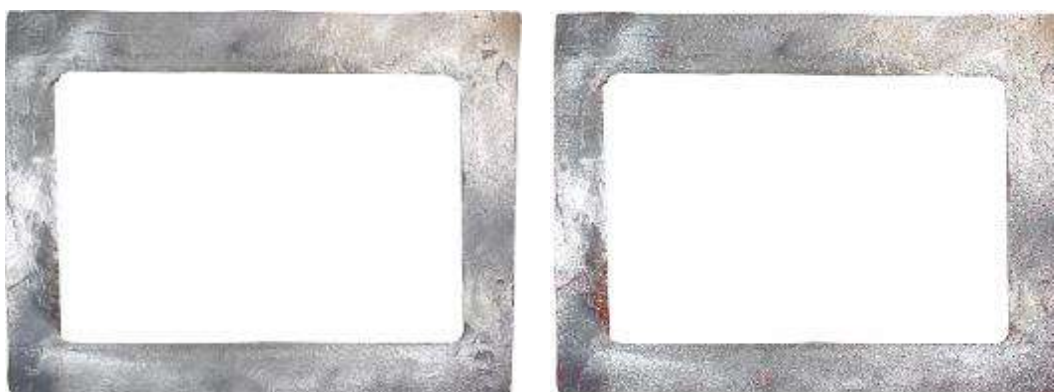
an-a 5.9 área afectada en la zona 3b.



área afectada (cm^2)

0.5760

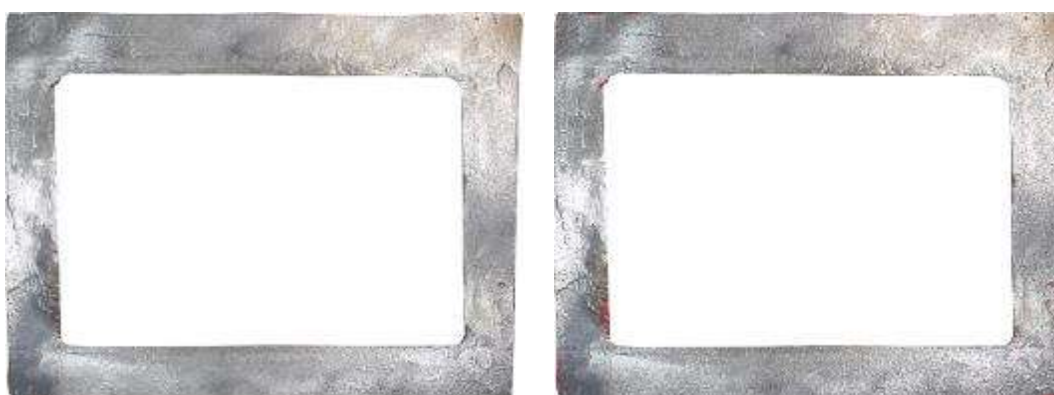
an-a 5.10 área afectada en la zona 3b(replica).



área afectada (cm^2)

1.7650

an-a 5.11 área afectada en la zona 4.



área afectada (cm^2)

0.6900

an-a 5.12 área afectada en la zona 4 (replica).



área afectada (cm^2)

0.9390

an-a 5.13 área afectada en la zona 5.



área afectada (cm^2)

0.1930

an-a 5.14 área afectada en la zona 5 (replica).



área afectada (cm^2)

0.7090

an-a 5.15 área afectada en la zona 6.



área afectada (cm^2)

0.1570

an-a 5.16 área afectada en la zona 6 (replica).



área afectada (cm^2)

0.2010

an-a 5.17 área afectada en la zona 7a.



área afectada (cm^2)

0.3270

an-a 5.18 área afectada en la zona 7a (replica).



área afectada (cm^2)

0.5060

an-a 5.19 área afectada en la zona 7b.



área afectada (cm^2)

0.3900

an-a 5.20 área afectada en la zona 7b (replica).



área afectada (cm^2)

0.1940

an-a 5.21 área afectada en la zona 8a.



área afectada (cm^2)

0.3060

an-a 5.22 área afectada en la zona 8a (replica).



área afectada (cm^2)

0.2360

an-a 5.23 área afectada en la zona 8b.



área afectada (cm^2)

0.0800

an-a 5.24 área afectada en la zona 8b (replica).

an-a 6 ÁREAS AFECTADAS EN LA PIEZA DEL EXPERIMENTO 6.



área afectada (cm^2)

0.0550

an-a 6.1 área afectada en la zona 1.



área afectada (cm^2)

0.0010

an-a 6.2 área afectada en la zona 1 (replica).



área afectada (cm^2)

2.0020

an-a 6.3 área afectada en la zona 2a.



área afectada (cm^2)

1.3350

an-a 6.4 área afectada en la zona 2a (replica).



área afectada (cm^2)

0.6910

an-a 6.5 área afectada en la zona 2b.



área afectada (cm^2)

0.2200

an-a 6.6 área afectada en la zona 2b (replica).



área afectada (cm^2)

0.1090

an-a 6.7 área afectada en la zona 3a.



área afectada (cm^2)

0.0610

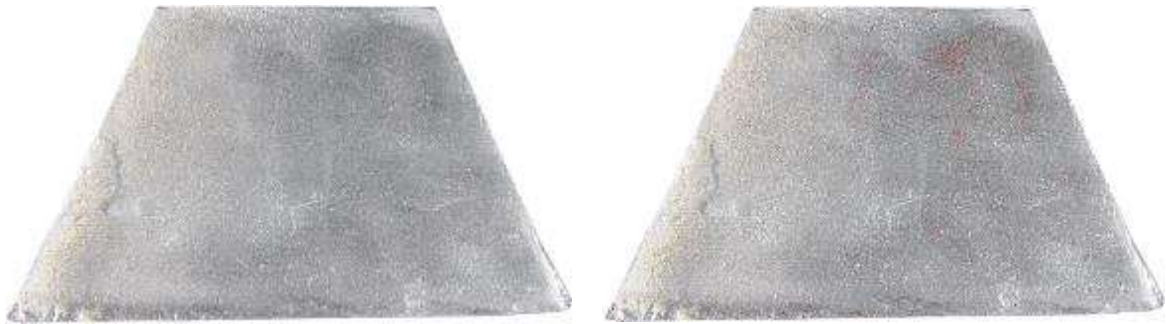
an-a 6.8 área afectada en la zona 3a (replica).



área afectada (cm^2)

0.0270

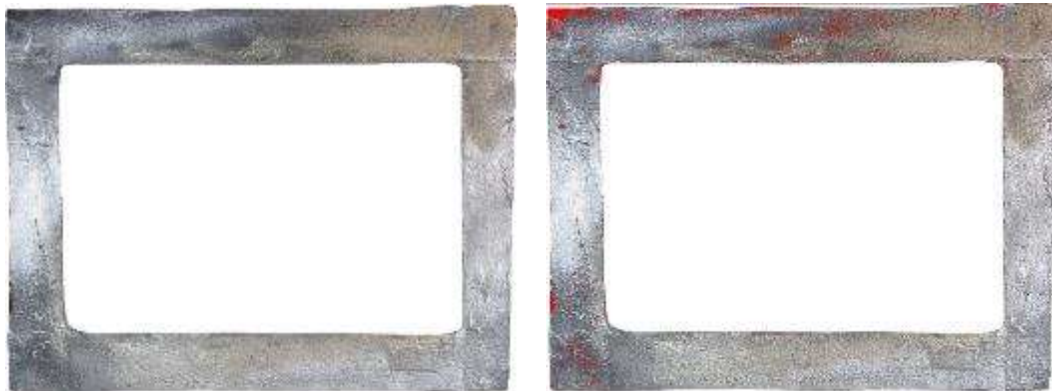
an-a 6.9 área afectada en la zona 3b.



área afectada (cm²)

0.1740

an-a 6.10 área afectada en la zona 3b(replica).



área afectada (cm²)

3.3360

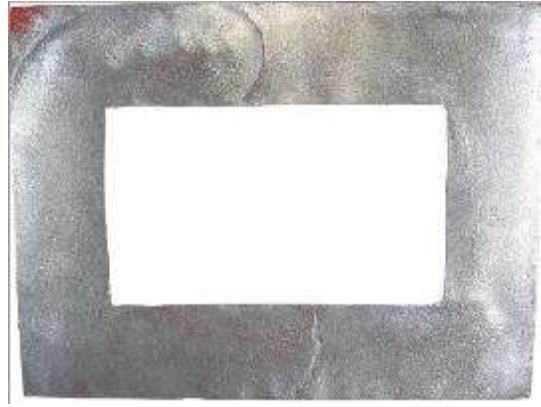
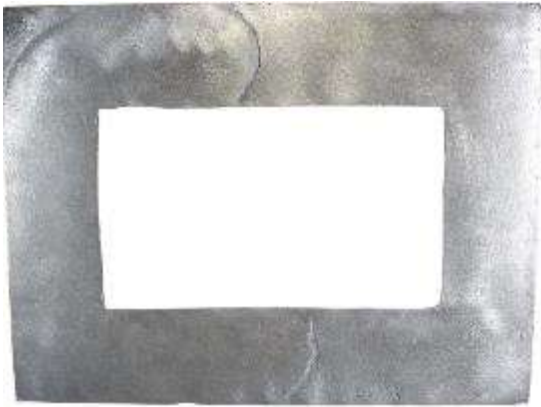
an-a 6.11 área afectada en la zona 4.



área afectada (cm²)

3.0410

an-a 6.12 área afectada en la zona 4 (replica).



área afectada (cm^2)

1.4130

an-a 6.13 área afectada en la zona 5.



área afectada (cm^2)

1.9340

an-a 6.14 área afectada en la zona 5 (replica).



área afectada (cm^2)

0.1810

an-a 6.15 área afectada en la zona 6.



área afectada (cm^2)

0.1750

an-a 6.16 área afectada en la zona 6 (replica).



área afectada (cm^2)

0.2850

an-a 6.17 área afectada en la zona 7a.



área afectada (cm^2)

0.4530

an-a 6.18 área afectada en la zona 7a (replica).



área afectada (cm^2)

0.1170

an-a 6.19 área afectada en la zona 7b.



área afectada (cm^2)

0.1070

an-a 6.20 área afectada en la zona 7b (replica).



área afectada (cm^2)

0.2310

an-a 6.21 área afectada en la zona 8a.



área afectada (cm^2)

0.1320

an-a 6.22 área afectada en la zona 8a (replica).



área afectada (cm^2)

0.2320

an-a 6.23 área afectada en la zona 8b.



área afectada (cm^2)

0.2570

an-a 6.24 área afectada en la zona 8b (replica).

an-a 7 ÁREAS AFECTADAS EN LA PIEZA DEL EXPERIMENTO 7.



área afectada (cm^2)

0.0001

an-a 7.1 área afectada en la zona 1.



área afectada (cm^2)

0.0290

an-a 7.2 área afectada en la zona 1 (replica).



área afectada (cm^2)

0.1260

an-a 7.3 área afectada en la zona 2a.



área afectada (cm^2)

0.8180

an-a 7.4 área afectada en la zona 2a (replica).



área afectada (cm^2)

0.2050

an-a 7.5 área afectada en la zona 2b.



área afectada (cm^2)

0.1670

an-a 7.6 área afectada en la zona 2b (replica).



área afectada (cm^2)

0.5510

an-a 7.7 área afectada en la zona 3a.



área afectada (cm^2)

0.1730

an-a 7.8 área afectada en la zona 3a (replica).



área afectada (cm^2)

0.0440

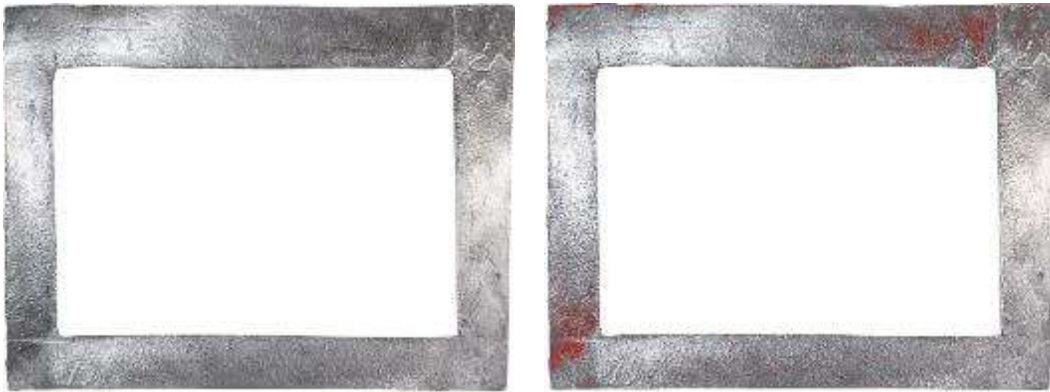
an-a 7.9 área afectada en la zona 3b.



área afectada (cm^2)

0.0350

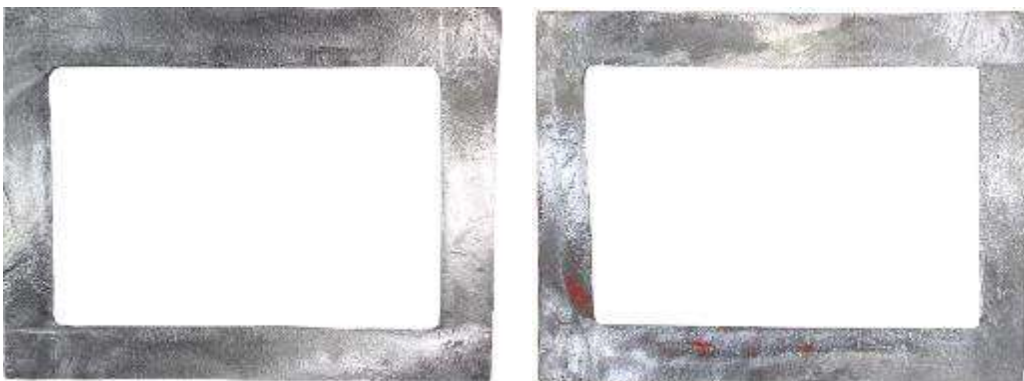
an-a 7.10 área afectada en la zona 3b(replica).



área afectada (cm^2)

2.7930

an-a 7.11 área afectada en la zona 4.



área afectada (cm^2)

1.1940

an-a 7.12 área afectada en la zona 4 (replica).



área afectada (cm^2)

2.1290

an-a 7.13 área afectada en la zona 5.



área afectada (cm^2)

0.4390

an-a 7.14 área afectada en la zona 5 (replica).



área afectada (cm^2)

0.3170

an-a 7.15 área afectada en la zona 6.



área afectada (cm²)

0.1160

an-a 7.16 área afectada en la zona 6 (replica).



área afectada (cm²)

0.0400

an-a 7.17 área afectada en la zona 7a.



área afectada (cm²)

0.1070

an-a 7.18 área afectada en la zona 7a (replica).



área afectada (cm²)

0.0680

an-a 7.19 área afectada en la zona 7b.



área afectada (cm²)

0.0799

an-a 7.20 área afectada en la zona 7b (replica).



área afectada (cm²)

1.7010

an-a 7.21 área afectada en la zona 8a.



área afectada (cm^2)

0.0980

an-a 7.22 área afectada en la zona 8a (replica).



área afectada (cm^2)

1.0640

an-a 7.23 área afectada en la zona 8b.



área afectada (cm^2)

0.0800

an-a 7.24 área afectada en la zona 8b (replica).

an-a 8 ÁREAS AFECTADAS EN LA PIEZA DEL EXPERIMENTO 8.



área afectada (cm^2)

0.2190

an-a 8.1 área afectada en la zona 1.



área afectada (cm^2)

0.0560

an-a 8.2 área afectada en la zona 1 (replica).



área afectada (cm^2)

0.4940

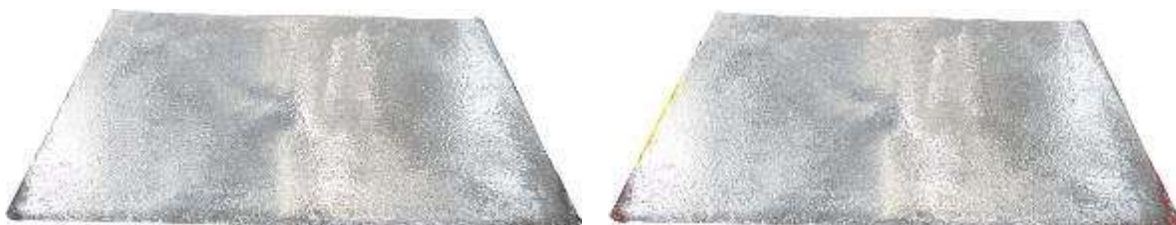
an-a 8.3 área afectada en la zona 2a.



área afectada (cm^2)

0.1930

an-a 8.4 área afectada en la zona 2a (replica).



área afectada (cm^2)

0.4010

an-a 8.5 área afectada en la zona 2b.



área afectada (cm^2)

0.2990

an-a 8.6 área afectada en la zona 2b (replica).



área afectada (cm^2)

0.6860

an-a 8.7 área afectada en la zona 3a.



área afectada (cm^2)

0.3360

an-a 8.8 área afectada en la zona 3a (replica).



área afectada (cm^2)

0.0570

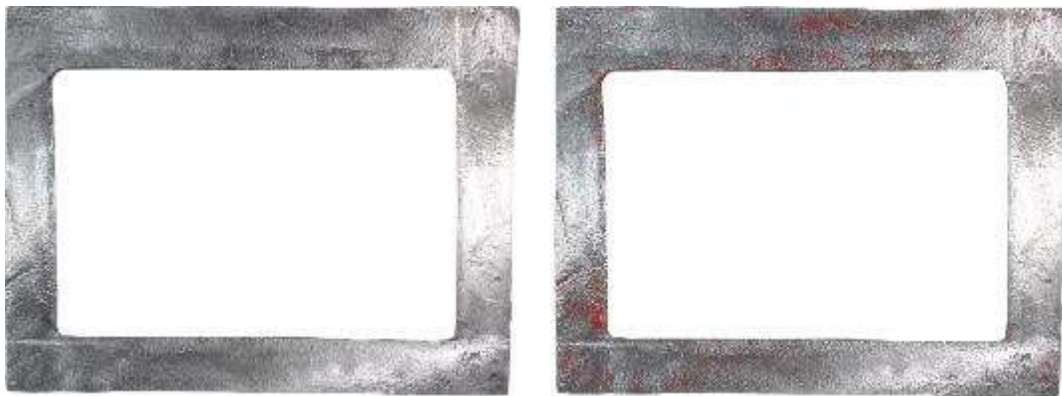
an-a 8.9 área afectada en la zona 3b.



área afectada (cm^2)

0.2620

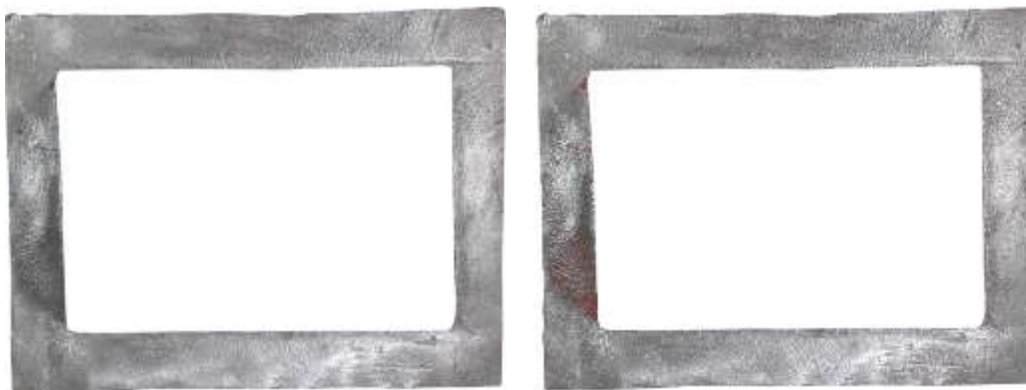
an-a 8.10 área afectada en la zona 3b(replica).



área afectada (cm^2)

2.4830

an-a 8.11 área afectada en la zona 4.



área afectada (cm^2)

0.9810

an-a 8.12 área afectada en la zona 4 (replica).



área afectada (cm^2) 0.3200

an-a 8.13 área afectada en la zona 5.



área afectada (cm^2) 2.0050

an-a 8.14 área afectada en la zona 5 (replica).



área afectada (cm^2) 0.1400

an-a 8.15 área afectada en la zona 6.



área afectada (cm^2)

0.1220

an-a 8.16 área afectada en la zona 6 (replica).



área afectada (cm^2)

0.0820

an-a 8.17 área afectada en la zona 7a.



área afectada (cm^2)

0.0730

8.8.18 área afectada en la zona 7a (replica).



área afectada (cm^2)

0.6250

an-a 8.19 área afectada en la zona 7b.



área afectada (cm^2)

0.1370

an-a 8.20 área afectada en la zona 7b (replica).



área afectada (cm^2)

0.1300

an-a 8.21 área afectada en la zona 8a.



área afectada (cm^2)

0.1350

an-a 8.22 área afectada en la zona 8a (replica).



área afectada (cm^2)

0.1630

an-a 8.23 área afectada en la zona 8b.



área afectada (cm^2)

0.1280

an-a 8.24 área afectada en la zona 8b (replica).

anexo b
cuantificación del
área de defectos
internos

an-b ÁREAS AFECTADAS EN LAS PIEZAS DEL EXPERIMENTO 1.



área afectada (cm^2)

0.0256

an-b 1.a Área afectada en la zona a.



área afectada (cm^2)

0.0420

an-b 1.b Área afectada en la zona b.



área afectada (cm^2)

an-b 1.c Área afectada en la zona c.



0.0220



área afectada (cm^2)

an-b 1.d Área afectada en la zona d.



0.0630



área afectada (cm^2)

0.0668

an-b 1.ar Área afectada en la zona a (réplica).



área afectada (cm^2)

0.1820

an-b 1.br Área afectada en la zona b (réplica).



área afectada (cm^2)

0.0199

an-b 1.cr Área afectada en la zona c (réplica).



área afectada (cm^2)

0.0313

an-b 1.dr Área afectada en la zona d (réplica).

an-b 2. ÁREAS AFECTADAS EN LAS PIEZAS DEL EXPERIMENTO 2.



área afectada (cm^2)

an-b 2.a Área afectada en la zona a.



0.0494



área afectada (cm^2)

an-b 2.b Área afectada en la zona b.



0.0212



área afectada (cm^2)

0.0259

an-b 2.c Área afectada en la zona c.



área afectada (cm^2)

0.2019

an-b 2.d Área afectada en la zona d.



área afectada (cm^2)

0.0504

an-b 2.ar Área afectada en la zona a (réplica).



área afectada (cm^2)

0.0993

an-b 2.br Área afectada en la zona b (réplica).



área afectada (cm^2)

an-b 2.cr Área afectada en la zona c (réplica).



0.0570



área afectada (cm^2)

an-b 2.dr Área afectada en la zona d (réplica).



0.0600

an-b 3. ÁREAS AFECTADAS EN LAS PIEZAS DEL EXPERIMENTO 3.



área afectada (cm^2)

an-b 3.a Área afectada en la zona a.

0.0517



área afectada (cm^2)

an-b 3.b Área afectada en la zona b.

0.0375



área afectada (cm^2)

an-b 3.c Área afectada en la zona c.

0.0192



área afectada (cm^2)

an-b 3.d Área afectada en la zona d.

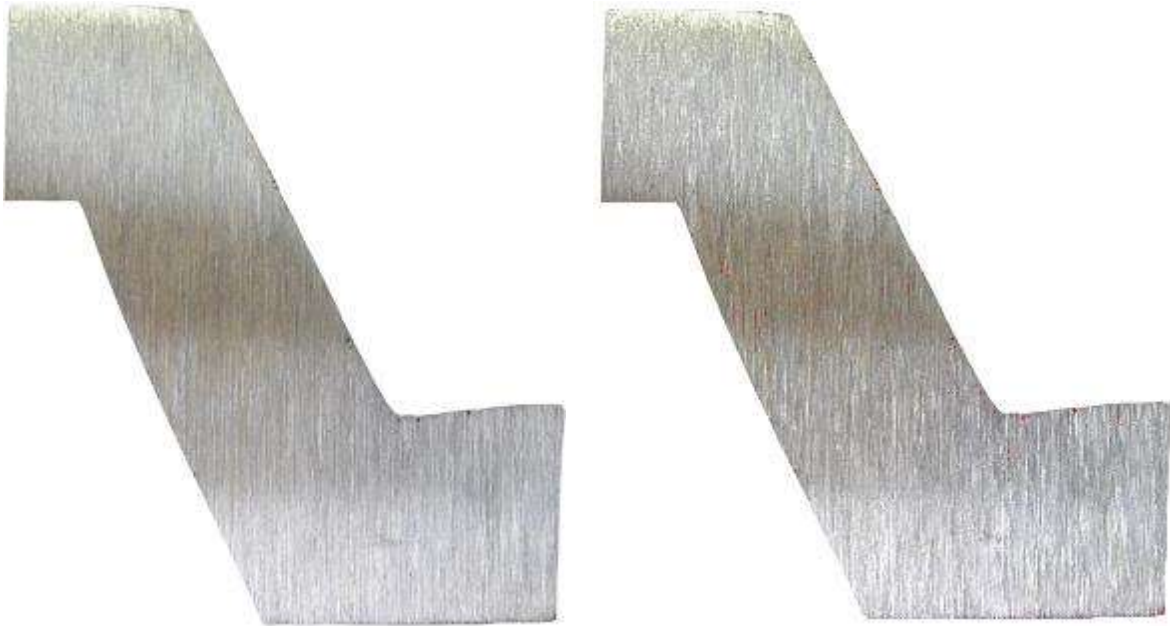
0.0208



área afectada (cm^2) 0.0536
an-b 3.ar Área afectada en la zona a (réplica).



área afectada (cm^2) 0.0740
an-b 3.br Área afectada en la zona b (réplica).



área afectada (cm^2)

0.0551

an-b 3.cr Área afectada en la zona c (réplica).



área afectada (cm^2)

0.0240

an-b 3.dr Área afectada en la zona d (réplica).

an-b 4. ÁREAS AFECTADAS EN LAS PIEZAS DEL EXPERIMENTO 4.



área afectada (cm^2)

0.0530

an-b 4.a Área afectada en la zona a.



área afectada (cm^2)

0.0690

an-b 4.b Área afectada en la zona b.



área afectada (cm^2)

an-b 4.c Área afectada en la zona c.



0.0870



área afectada (cm^2)

an-b 4.d Área afectada en la zona d.



0.0730



área afectada (cm^2)

an-b 4.ar Área afectada en la zona a (réplica).

0.0690



área afectada (cm^2)

an-b 4.br Área afectada en la zona b (réplica).

0.1620



área afectada (cm^2)

0.1050

an-b 4.cr Área afectada en la zona c (réplica).



área afectada (cm^2)

0.1209

an-b 4.dr Área afectada en la zona d (réplica).

an-b 5. ÁREAS AFECTADAS EN LAS PIEZAS DEL EXPERIMENTO 5.



área afectada (cm^2)

an-b 5.a Área afectada en la zona a.



0.0720



área afectada (cm^2)

an-b 5.b Área afectada en la zona b.



0.0226



área afectada (cm^2)

an-b 5.c Área afectada en la zona c.



0.0410



área afectada (cm^2)

an-b 5.d Área afectada en la zona d.



0.0200



área afectada (cm^2)

an-b 5.ar Área afectada en la zona a (réplica).

0.0290



área afectada (cm^2)

an-b 5.br Área afectada en la zona b (réplica).

0.1300



área afectada (cm^2)

0.0400

an-b 5.cr Área afectada en la zona c (réplica).



área afectada (cm^2)

0.1440

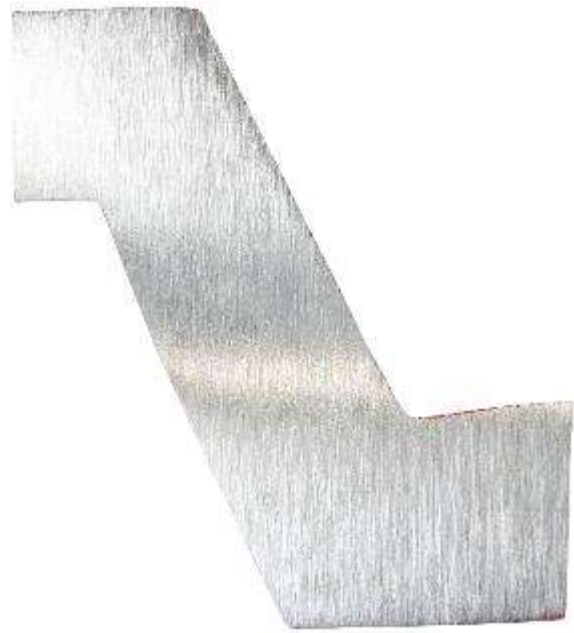
an-b 5.dr Área afectada en la zona d (réplica).

an-b 6. ÁREAS AFECTADAS EN LAS PIEZAS DEL EXPERIMENTO 6.



área afectada (cm^2)

an-b 6.a Área afectada en la zona a.



0.0338



área afectada (cm^2)

an-b 6.b Área afectada en la zona b.



0.0260



área afectada (cm^2)

an-b 6.c Área afectada en la zona c.



0.0150



área afectada (cm^2)

an-b 6.d Área afectada en la zona d.



0.0260



área afectada (cm^2) 0.0240
an-b 6.ar Área afectada en la zona a (réplica).



área afectada (cm^2) 0.0520
an-b 6.br Área afectada en la zona b (réplica).



área afectada (cm^2)

0.0070

an-b 6.cr Área afectada en la zona c (réplica).



área afectada (cm^2)

0.0300

an-b 6.dr Área afectada en la zona d (réplica).

an-b 7. ÁREAS AFECTADAS EN LAS PIEZAS DEL EXPERIMENTO 7.



área afectada (cm^2)

an-b 7.a Área afectada en la zona a.



0.0210



área afectada (cm^2)

an-b 7.b Área afectada en la zona b.



0.0070



área afectada (cm^2)

an-b 7.c Área afectada en la zona c.



0.0347



área afectada (cm^2)

an-b 7.d Área afectada en la zona d.



0.0170



área afectada (cm^2)

0.0290

an-b 7.ar Área afectada en la zona a (réplica).



área afectada (cm^2)

0.0326

an-b 7.br Área afectada en la zona b (réplica).

FR



área afectada (cm^2)

0.0170

an-b 7.cr Área afectada en la zona c (réplica).



área afectada (cm^2)

0.0080

an-b 7.dr Área afectada en la zona d (réplica).

an-b 8. ÁREAS AFECTADAS EN LAS PIEZAS DEL EXPERIMENTO 8.



área afectada (cm^2)

an-b 8.a Área afectada en la zona a.



0.0340



área afectada (cm^2)

an-b 8.b Área afectada en la zona b.



0.0660



área afectada (cm^2)

an-b 8.c Área afectada en la zona c.



0.0650



área afectada (cm^2)

an-b 8.d Área afectada en la zona d.



0.0356



área afectada (cm^2)

0.0080

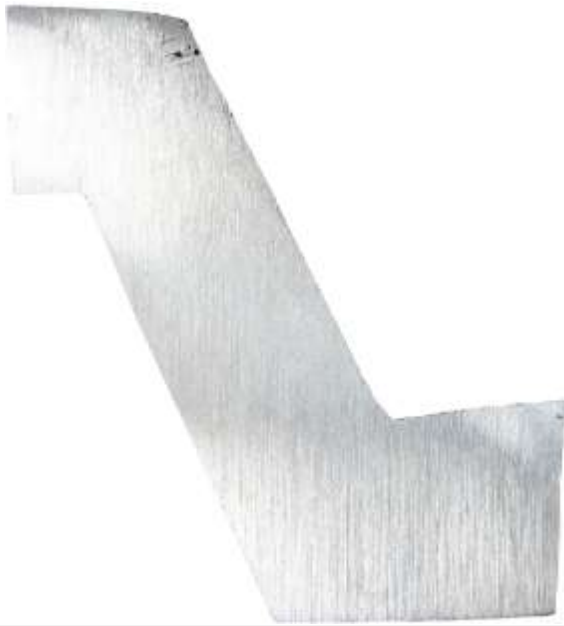
an-b 8.ar Área afectada en la zona a (réplica).



área afectada (cm^2)

0.0250

an-b 8.br Área afectada en la zona b (réplica).



área afectada (cm^2)

an-b 8.cr Área afectada en la zona c (réplica).



0.0481



área afectada (cm^2)

an-b 8.dr Área afectada en la zona d (réplica).



0.0022